

مقدمة قصيرة جدًّا

الكواكب

ديفيد إيه روذري

الكواكب

الكواكب

مقدمة قصيرة جدًّا

تأليف
ديفيد إيه روذري

ترجمة
هاني فتحي سليمان

مراجعة
مصطفى محمد فؤاد

هنداوي

الكواكب

ديفيد إيه روذري

Planets

David A. Rothery

الطبعة الأولى ٢٠١٦م
رقم إيداع ١١٠٨٥/ ٢٠١٥
جميع الحقوق محفوظة للناشر مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة
المشهرة برقم ٨٨٦٢ بتاريخ ٢٦ / ٨ / ٢٠١٢

مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة
إن مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة غير مسئولة عن آراء المؤلف وأفكاره
وإنما يعبِّر الكتاب عن آراء مؤلفه
٥٤ عمارات الفتح، حي السفارات، مدينة نصر ١١٤٧١، القاهرة
جمهورية مصر العربية
تليفون: ٢٢٧٠٦٣٥٢ ٢٠٢ + **فاكس:** ٣٥٣٦٥٨٥٣ ٢٠٢ +
البريد الإلكتروني: hindawi@hindawi.org
الموقع الإلكتروني: http://www.hindawi.org

روذري، ديفيد إيه.
الكواكب: مقدمة قصيرة جدًّا/تأليف ديفيد إيه روذري.
تدمك: ١ ٢٩٦ ٧٦٨ ٩٧٧ ٩٧٨
١-الكواكب
أ-العنوان
٥٢٣,٤

تصميم الغلاف: إيهاب سالم.

المحتويات

مقدمة

في سونيتة يعود تاريخها لعام ١٨١٦، تأمَّل الشاعر الإنجليزي الشاب جون كيتس تجربته الخاصة بقراءة ترجمة جديدة لأعمال هوميروس، وكتب عن «تنفس الأجواء الهادئة النقية» في «عوالم من الذهب»، وتابع قائلًا:

بعدها شعرت مثل شعور أحد مراقبي السماء
عندما يسبح كوكب جديد ليدخل في نطاق بصره
أو مثل كورتيز الشجاع عندما كان يحملق بعينيه الحادتين
في المحيط الهادئ، ونظر جميع رجاله
بعضهم إلى بعض في تساؤل مفعم بالحماس
وهم في حالة صمت من على إحدى قمم الجبال في داريان.

استلهم كيتس صورته المجازية الخاصة بالكوكب الجديد من رؤية السير ويليام هيرشل لكوكب أورانوس في عام ١٧٨١، أو من اكتشافات الكويكبات الأربعة الأولى (التي حدثت فيما بين عامي ١٨٠١ و١٨٠٧). وباعتبار الكويكبات الأربعة الأولى أحدث زمنًا، فإنها ستكون ما زالت حاضرة على نحو أقوى في ذاكرة الناس. وشخص عادي مثل كيتس يمكن أن يكون قد ظنها كواكب جديدة، بالرغم من أنها اليوم يُنظر إليها باعتبارها أصغر من أن يُطلق عليها اسم كواكب.

ما زلت أشعر وكأنني أتنقل في «عوالم من الذهب» عندما أرى زحل بعينيَّ عبر حتى تليسكوب صغير، بالرغم من أن الشعور بإثارة الشيء الجديد قد يتلاشى نوعًا ما عندما أرى كرة ثلجية نائية مكتشفة حديثًا، كنقطة صغيرة في صورة رقمية، أو ألمح رفيقًا، في حجم كوكب المشتري، لنجم آخر من خلال اضطراب متناهٍ في الصغر في موقع هذا النجم.

ومع ذلك، بالنسبة لي، تتكرر «تجربة كورتيز» الفعلية كلما رأيت مشهدًا كوكبيًّا جديدًا (في بعض الأحيان، مشهدًا سحابيًّا) يتكشف أمام ناظري عبر صورٍ الْتَقَطَتْها إحدى مركبات الفضاء. لقد وصل استكشاف مجموعتنا الشمسية مرحلةً تسمح لنا بالنظر إلى الكواكب وأقمارها الضخمة باعتبارها عوالم لها جغرافيتها وجيولوجيتها وظواهرها الجوية، التي لا تقل في تعقيدها وجاذبيتها عن كوكبنا؛ كوكب الأرض. والكثير منها بمنزلة أماكن يمكن لنا — نظريًّا — أن نقوم بزيارتها. صحيح أنها بوجه عام غير مناسبة لقضاء نزهة على ظهرها، لكننا على الأقل نستطيع التحرك عليها، أو حَمْل بعضٍ من ترابها بأَكُفِّنا، أو تسلُّق أحد تلالها، أو الهبوط إلى أحد أوديتها، بل إن هناك حتى احتمالات لأن تكون هناك حياة على ظهر بعضها.

في هذا الكتاب، سوف أُبيِّن لك ما هو معروف عن منشأ كواكب مجموعتنا الشمسية وتطورها، وعلى الأخص وضعها الحالي. وفي هذا الصدد، علماء الفلك لا يعترفون الآن رسميًّا إلَّا بثمانية كواكب (تم حذف بلوتو، كما سأُبيِّن لاحقًا)، لكن هناك الكثير من الأجرام الأخرى الكبيرة الحجم على نحو كافٍ بحيث تسلك سلوك الكواكب، وذلك من وجهة نظر جيولوجيين مثلي. تلك الأجرام من الجاذبية بحيث لا يمكنني تجاهلها، بالرغم من أن عددها كبير للغاية بحيث لا يمكن تناول كل واحد منها على حدة.

وفي النهاية، سوف أتحول إلى «الكواكب الواقعة خارج المجموعة الشمسية»، وهي تلك التي تدور حول نجوم أخرى. اكتُشف أول هذه الكواكب مؤخرًا في عام ١٩٩٥، ومنذ ذلك الحين وإلى الآن تم اكتشاف وتوثيق عدة مئات منها. إننا لا يمكننا رؤية تلك الأجرام بالتفصيل، لكننا نمتلك معلومات كافية لعقد مقارنات بين مخططات المجموعات الكوكبية الخارجية هذه والمجموعة الشمسية.

الفصل الأول

المجموعة الشمسية

(١) الكواكب من واقع التاريخ

قبل أن تحل بالعالم لعنات التلوث الضوئي والضباب الدخاني، كانت سماء الليل مألوفة أكثر للناس مما عليه الحال اليوم. وكانت الثقافات القديمة تنظر إلى الكواكب في السماء باعتبارها أشياء مميزة؛ لأنها «نجوم جوالة» تنتقل من مكان لآخر على خلفية «النجوم الثابتة». ثمة خمسة كواكب معروفة منذ القدم: عطارد والزهرة والمريخ والمشتري وزحل؛ وهي الكواكب الوحيدة التي تتمتع بقدر من اللمعان يكفي لأن يلفت انتباه العين المجردة. وبطبيعة الحال، الشمس والقمر كانا بارزَين أيضًا، لكن الكواكب تبدو على هيئة نقاط ضوئية جوالة، في حين أن الشمس والقمر يظهران على شكل قرصين، وغالبًا ما يُنظر إليهما على نحو مختلف. وخلال معظم عصور الوجود البشري، كان يُنظر إلى كوكب الأرض باعتباره مركز الخلق، والذي لا علاقة له بالأجرام التي في السماء؛ ومن ثم لم يكن يُعتقد أن الأرض أحد الكواكب.

القفزات الفكرية التي أدركت أن الأرض عبارة عن كرة من الصخر تدور حول الشمس، وأن الكواكب تفعل نفس الشيء، وأن الأرض ما هي إلا واحد من تلك الكواكب؛ كانت موجودة منذ زمن بعيد، لكن عملية ظهورها استغرقت وقتًا طويلًا، وكان هناك الكثير من المحاولات، فخلال القرن الخامس قبل الميلاد، خمَّن الفيلسوف اليوناني أناكساجوراس على نحو صحيح أن القمر جرْمٌ كروي يعكس ضوء الشمس، وقد نُفي بسبب اعتقاده هذا. وفي القرون اللاحقة، توصل علماء فلك صينيون عديدون إلى أفكار مشابهة، لكن فكرة أن القمر كروي الشكل لم تصبح — على الأرجح — حقيقة راسخة في أذهان الناس إلَّا بعد أن تم رصده عبر تليسكوب خلال القرن السابع عشر.

فيما يتعلق بالكواكب، ظل يُنظر إليها عمومًا باعتبارها نقاطًا ضوئية تدور حول كوكب الأرض، إلى أن تم التسليم بفكرةِ «مركزية الشمس» المضادة للحدس، والتي جعلت الشمس مركز الحركة. وأُولى الإشارات المكتوبة التي رجحت دوران كوكب الأرض حول الشمس ورَدتْ في نصوص هندية يرجع تاريخها إلى القرن التاسع قبل الميلاد، لكن رغم تلك الإشارات والإشارات الأخرى اللاحقة، لا سيما تلك التي وردت عن الحكماء الإغريق والمسلمين، وعن نيكولاس كوبرنيكوس في نهاية المطاف، وذلك في عام ١٥٤٣؛ لم تترسخ الفكرة تمامًا إلا بحلول القرن الثامن عشر؛ فقد وُضع جاليليو (الذي تمكَّن من خلال تليسكوبه من رؤية جبال على سطح القمر، ورصد مراحل كوكب الزهرة وأربعة أقمار صغيرة تدور حول كوكب المشتري) قيد الإقامة الجبرية من عام ١٦٣٣ حتى وافته المنية عام ١٦٤٢؛ ويرجع ذلك جزئيًّا إلى مناصرته لنظرية مركزية الشمس.

أظهر استخدام التليسكوب، من بداية القرن السابع عشر فصاعدًا، أن الكواكب تختلف اختلافًا جوهريًّا عن النجوم، بعد أن أوضح أن الكواكب عبارة عن أقراص صغيرة لكنها مميزة، في حين أن النجوم ظلت نقاطًا ضوئية، ومهَّد هذا الطريق أمام اعتبار الكواكب عوالم مشابهة لعالمنا. وبالمناسبة، نحن نعرف الآن أن النجوم أكبر بكثير من الكواكب، لكنها (باستثناء الشمس) أبعد كثيرًا جدًّا عن كوكبنا لدرجة تعجز عندها — إلَّا في استثناءات قليلة — حتى أكثر التليسكوبات الحديثة تطورًا عن إظهار أي تفاصيل عن سطحها (في الصور الفوتوغرافية، تبدو النجوم الساطعة أكبر من النجوم الخافتة، لكن هذا لا يعدو كونه خداعًا بصريًّا).

(٢) قوانين كبلر عن حركة الكواكب

تم التوصل للترتيب الصحيح الذي نعرفه اليوم للكواكب بفضل توصُّل يوهانس كبلر (١٦٠٩) إلى حقيقة أن: الكواكب (بما فيها كوكبنا الأرضي) تدور حول الشمس في مسارات (مدارات) تكون على هيئة قَطْع ناقص وليست دائرة كاملة، وكذلك بفضل الرؤية الكاشفة للجاذبية التي زوَّدَنا بها إسحاق نيوتن (١٦٨٧) التي تفسِّر هذا الدوران. وبعد ذلك، أصبح من الممكن البدء في استنتاج المسافات التي بين تلك الكواكب وكوكب الأرض، وأحجامها مقارنةً به.

والقطع الناقص هو شكل «بيضاوي»، ويُعرف رياضيًّا بأنه منحنًى مغلق يُرسم حول نقطتين (بؤرتَي القطع الناقص) بحيث يكون مجموع المسافتين من كل بؤرة لأي

نقطة على المنحنى واحدًا. والدائرة نوع خاص من القطع الناقص؛ حيث تتطابق فيه البؤرتان عند مركز الدائرة، وكلما كانت المسافة بين البؤرتين أكبر، كان القطع الناقص أكثر استطالة أو «لاتراكزية». استنتج كبلر أن الكواكب تدور في مدارات على هيئة قطع ناقص؛ حيث تكون الشمس عند إحدى بؤرتي كل قطع ناقص (في حين تكون البؤرة الأخرى خالية). ويُطلق على أقرب نقطة في مدار الكوكب إلى الشمس «الحضيض»، ويُطلق على أبعد نقطة في مداره عن الشمس «الأوج». ومدارات الكواكب ليست لا تراكزية بشدة؛ ولا يشبه شكلُها كثيرًا شكلَ القطع الناقص، وإذا نظرت إليها مرسومة على مستوًى أفقي؛ فإنها تبدو أشبه كثيرًا بالدوائر. على سبيل المثال، عندما يكون المريخ في الأوج، تزيد المسافة بينه وبين الشمس بمقدار يقل عن ٢١٪ مقارنةً بما يكون عليه الحال عندما يكون في الحضيض، وبالنسبة للأرض يكون الفارق ٤٪ فقط.

يشتهر كبلر بقوانينه الثلاثة عن حركة الكواكب. وقانون كبلر الأول ينص ببساطة على أن كل كوكب يتحرك في مدار على هيئة قطع ناقص، مع وجود الشمس عند إحدى بؤرتيه. ويصف القانون الثاني كيفية تباين سرعة حركة الكوكب في مداره: يتحرك الكوكب أسرع كلما اقترب من الشمس (لأسباب أوضحتْها لاحقًا نظرية الجاذبية لنيوتن) بحيث يقطع الخطُّ التخيليُّ الذي يصل بين الكوكب والشمس مساحاتٍ متساويةً في أوقات متساوية. أما قانون كبلر الثالث، فيربط بين الفترة المدارية للكوكب (ويُقصد بها المدة التي يستغرقها الكوكب في إكمال دورة واحدة حول الشمس) ومتوسط المسافة بينه وبين الشمس: مربع الفترة المدارية لكوكب يتناسب طرديًّا مع مكعب متوسط المسافة بينه وبين الشمس. وقد تبين أن متوسط المسافة بين كوكب معين والشمس يساوي نصف طول المحور الطولي للقطع الناقص المداري (محوره شبه الكبير) أو، إذا شئت، نصف المسافة المستقيمة بين الحضيض والأوج.

من خلال قوانين كبلر الخاصة بحركة الكواكب، أمكن حساب أحجام مدارات الكواكب الأخرى بدقة، وهذه الدقة تظل رهينة — على نحو شبه تام — لمدى دقة الطريقة التي قِيسَ بها حجم مدار كوكب الأرض. وحتى مع العودة إلى الوراء كثيرًا، وتحديدًا إلى عام ١٦٧٢، أمكن من خلال المشاهدات المتزامنة لكوكب المريخ من مواقع متباعدة قياس المسافة بين كوكب الأرض والشمس، التي قُدرت بنحو ١٤٠ مليون كيلومتر، وهي القيمة التي تقترب — على نحو لافت — من القيمة الصحيحة التي تبلغ ١٤٩٥٩٧٨٧١ كيلومترًا. والمشاهدات التي رصدت عبور كوكب الزهرة أمام قرص الشمس فيعامَي ١٧٦١ و١٧٦٩

(تَطلَّب العبور الثاني من المستكشف الإنجليزي جيمس كوك أن يسافر إلى تاهيتي) ساعدت على الوصول إلى تقدير جديد يتراوح بين ١٥٢ و١٥٤ مليون كيلومتر. وبالرغم من هذه التطورات العلمية وغيرها، التي استمرت في تعزيز نموذج متسق ورائع على نحو تامٍّ لنطاق وطبيعة المجموعة الشمسية؛ ظل الحظر البابوي على طباعة الكتب التي تتحدث عن «مركزية الشمس» في روما على حاله حتى عام ١٨٢٢.

جدول ١-١: أحجام الكواكب (الأقطار الاستوائية الخاصة بالكواكب).

الكوكب	القيمة التي نُشرت عام ١٨٩٤*	القيمة الصحيحة
عطارد	٤٧٢٠ كيلومترًا	٤٨٨٠ كيلومترًا
الزهرة	١٢٦٠٠ كيلومتر	١٢١٠٤ كيلومترات
الأرض	١٢٧٥٦ كيلومترًا	١٢٧٥٢ كيلومترًا
المريخ	٦٧٦٠ كيلومترًا	٦٧٩٤ كيلومترًا
المشتري	١٤٢٠٠٠ كيلومتر	١٤٢٩٨٠ كيلومترًا
زحل	١١٩٠٠٠ كيلومتر	١٢٠٥٤٠ كيلومترًا
أورانوس	٥٣٦٠٠ كيلومتر	٥١١٢٠ كيلومترًا
نبتون	٤٨٥٠٠ كيلومتر	٤٩٥٤٠ كيلومترًا

* سي فلاماريون، «علم الفلك المبسط»، (تشاتو ووينداس، بيكاديللي).

ربما يكون مبررًا اعتقادُك أنه بمجرد أن تُحدَّد المسافة بين كوكب ما والشمس، يكون حساب حجم هذا الكوكب أمرًا سهلًا، لكن صغر حجم قرص الكوكب حتى عند استخدام تليسكوب ضخم، إضافة إلى تلألؤ الغلاف الجوي للأرض، يؤديان إلى حالة كبيرة من عدم اليقين عند قياس الحجم الزاوي للكوكب (بعبارة أخرى، الحجم الذي يبدو عليه). على سبيل المثال، عندما اكتشف ويليام هيرشل كوكب أورانوس عام ١٧٨١، كان قياسه لقرص الكوكب أكبر بمقدار ٨٪. وبدلًا من محاولة قياس الحجم الذي يبدو عليه كوكبٌ ما، فإن أدق طريقة تليسكوبية لتحديد حجمه هي تحديد المدة التي يستغرقها للمرور أمام نجم معين. و«حالات الكسوف» هذه نادرة الحدوث، لكن مع انتهاء القرن التاسع عشر، كان قد تم تحديد أحجام الكواكب بدقة كبيرة (انظر الجدول رقم ١-١).

اكتشف هيرشل كوكب أورانوس بالصدفة، لكن تم اكتشاف كوكب نبتون في عام ١٨٤٦ نتيجة لعملية بحث مدروس في ضوء اضطرابات طفيفة حدثت في مدار كوكب أورانوس (وحرَفَتْه عن هيئة القطع الناقص الذي كان عليه)، يمكن تفسيرها على أفضل نحو من خلال تأثير جاذبية كوكب خارجي غير مرئي. وعندما مرَّ على توثيقه وقت طويل بما يكفي، أظهر مدار نبتون بدوره اضطرابات تشير إلى كوكب أبعد غير مكتشف. وهذا أطلق عملية بحث جديدة انتهت باكتشاف كوكب بلوتو عام ١٩٣٠. في البداية، افترض علماء الفلك أن هذا الكوكب التاسع الجديد يشبه حتمًا في حجمه وكتلته كوكبَي أورانوس ونبتون. لكن بحلول عام ١٩٥٥، تبين أن كوكب بلوتو قد لا يكون أكبر حجمًا من الأرض، وفي عام ١٩٧١، تم تخفيض حجمه التقديري بحيث أصبح مساويًا لحجم كوكب المريخ، وفي عام ١٩٧٨، وُجد أن غاز الميثان المتجمد الذي يعكس الضوء بقوة يغطي أغلب سطح كوكب بلوتو، وكان هذا معناه تقليل حجمه الفعلي أكثر ليظل متسقًا مع سطوعه الكلي. نحن نعلم الآن أن قُطر كوكب بلوتو لا يتجاوز ٢٣٩٠ كيلومترًا؛ ومن ثَمَّ فإن حجمه أصغر (وكتلته، في واقع الأمر، أصغر «كثيرًا») حتى من كوكب عطارد. وتعزى هذه الاضطرابات الظاهرة في مدار نبتون، التي أدَّت — لحسن الحظ — لعملية البحث عن بلوتو حاليًّا، إلى عدم دقة المشاهدات.

في عام ٢٠٠٦، حُذف بلوتو من قائمة الكواكب المعترف بها رسميًّا. كانت هذه خطوة مثيرة للجدل، بالرغم من أنها — في رأيي — خطوة صائبة. وقبل أن أوضح كيف حدث هذا، سوف أستعرض طبيعة المجموعة الشمسية كما نفهمها حاليًّا.

(٣) نظرة عامة على المجموعة الشمسية

(٣-١) الشمس

تقع الشمس في مركز المجموعة الشمسية، وهي نجم عادي إلى حد كبير، ومصدر طاقتها تحوُّل الهيدروجين إلى هليوم عن طريق الاندماج النووي في لب الشمس. وقطر الشمس أكبر بـ ١٠٩ أضعاف من قطر الأرض، وكتلتها أكبر بنحو ٣٣٣ ألف ضعف من كتلة الأرض، كما أن كتلتها أكبر بنحو ٧٤٠ ضعفًا من كتلة جميع الأجرام الأخرى الموجودة في المجموعة الشمسية مجتمعة؛ ومن ثَمَّ فإن جاذبية الشمس تكون قوية جدًّا، لدرجة أن الأجرام الموجودة في المجموعة الشمسية تدور حول الشمس على هيئة قطع ناقص، وذلك

على النحو الذي بيَّنه كبلر، والاضطرابات التي تحدث لمدار كوكبٍ ما بفعل كواكب أخرى تكون صغيرة، بالرغم من أنه من الممكن قياسها.

(٣-٢) الكواكب

يلخص الجدول رقم ١-٢ بعض الخواص الأساسية للكواكب، وقد سِيقَت مقارنةً بكوكب الأرض لتجنُّب الأعداد الضخمة جدًّا. ويشار إلى بُعد الكوكب عن الشمس باستخدام «الوحدات الفلكية». والوحدة الفلكية هي متوسط المسافة بين الأرض والشمس. وهذه المسافة يسهل تذكرها؛ حيث إنها تقترب من ١٥٠ مليون كيلومتر. والفترة المدارية للكوكب هي المدة التي يستغرقها الكوكب كي يكمل دورة واحدة حول الشمس، وبالطبع هذه الفترة تمثل «السنة» بالنسبة لهذا الكوكب. والفترات المدارية للكواكب والمسافات بينها وبين الشمس — المبينتان في هذا الجدول — يربط بينهما قانون كبلر الثالث. وهذا يعني أن مربع الفترة المدارية لأي كوكب (تقدَّر بالسنوات الأرضية) يساوي مكعب متوسط المسافة بين الكوكب والشمس (تقدر بالوحدات الفلكية). وتقترب كتلة الأرض من ٦ ملايين مليار مليار كيلوجرام (أو ٦ آلاف مليار مليار طن)؛ ومن ثَمَّ فمن الأسهل مقارنة الكواكب الأخرى بكوكب الأرض بدلًا من ذكر الوحدات العلمية القياسية، مثل الكيلوجرامات والثواني والأمتار.

جدول ١-٢: مقارنة بين بعض خواص الكواكب. تشير المسافة بين الكوكب والشمس إلى متوسط المسافة، أما السنوات والأيام فهي سنوات وأيام الأرض. انظر الجدول رقم ١-١ لمراجعة الأحجام.

الكوكب	المسافة بينه وبين الشمس (بالوحدات الفلكية)	الفترة المدارية (بالسنوات)	الكتلة (بالنسبة للأرض)	فترة الدوران (بالأيام)
عطارد	٠,٣٨٧	٠,٢٤١	٠,٠٥٥	٥٨,٦
الزهرة	٠,٧٢٣	٠,٦١٥	٠,٨١	٢٤٣,٠
الأرض	١	١	١	١
المريخ	١,٥٢	١,٨٨	٠,١١	١,٠٢٦

الكوكب	المسافة بينه وبين الشمس (بالوحدات الفلكية)	الفترة المدارية (بالسنوات)	الكتلة (بالنسبة للأرض)	فترة الدوران (بالأيام)
المشتري	٥,٢٠	١١,٨٦	٣١٨	٠,٤١٠
زحل	٩,٥٨	٢٩,٤٦	٩٥,٢	٠,٤٤٤
أورانوس	١٩,١	٨٤,٠١	١٤,٥	٠,٧١٨
نبتون	٣٠,٠	١٦٤,٨	١٧,٢	٠,٧٦٨

إن فترة الدوران هي الفترة التي يستغرقها الكوكب ليكمل دورة واحدة حول محوره. وبالنسبة للكواكب التي تدور بسرعة، تكاد تكون فترة دورانها مساوية للوقت الذي يفصل بين شروقين للشمس («مدة يوم» الكوكب)، لكن العلاقة ليست دقيقة تمامًا؛ لأن الحركة المدارية للكوكب تغيِّر على نحو مستمر الاتجاه بين الكوكب والشمس. وفترة دوران الأرض حول محورها تبلغ ٢٣ ساعة و٥٦ دقيقة، لكنها تستغرق ٢٤ ساعة بالضبط للدوران على بُعدٍ كافٍ كي تعود الشمس — بالنسبة لها — لنفس النقطة من السماء. وبالنظر إليها من كوكبٍ ما، فإن الشمس تتحرك في أرجاء السماء خلال دورة واحدة للكوكب حولها، إضافة إلى تغير الاتجاه نحو الشمس من أي نقطة على سطح الكوكب نتيجة لدوران الكوكب حول محوره. والكوكب الذي أصبحت فترة دورانه حول محوره مساوية تمامًا لفترة دورانه حول الشمس (الدوران المتزامن) يظل وجهه دائمًا صوب الشمس. هذا لا ينطبق تمامًا على عطارد، لكنه يدور حول محوره «ثلاث» مرات بالضبط خلال «دورتين» حول الشمس؛ ونتيجة لذلك يصبح وجهه مواجهًا للشمس مرة كل دورتين حولها؛ ومن ثَمَّ فإن يومه يبلغ طوله ضعف عامه.

ثمة تغير في طبيعة الكواكب الداخلية الأربعة والكواكب الخارجية الأربعة؛ فالكواكب الداخلية (وهي عطارد والزهرة والأرض والمريخ) صغيرة نسبيًّا وقليلة الكتلة مقارنةً بالكواكب الخارجية الأربعة (وهي المشتري وزحل وأورانوس ونبتون). ثمة تبايُن بين كثافتهما؛ فالكواكب الداخلية أكثر كثافة من الخارجية. ويُطلق على الكواكب الداخلية «الكواكب الأرضية»، في إشارة إلى أن جميعها «شبيه بالأرض». أما الكواكب الخارجية فيطلق عليها «الكواكب العملاقة». البعض يطلِق عليها «العمالقة الغازية» للإشارة إلى

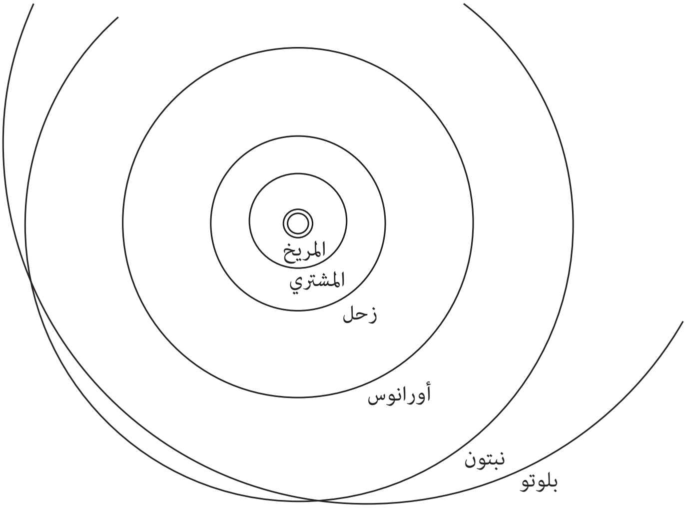
حقيقة أنها تحتوي على قدر هائل من الهيدروجين والهليوم، وآخرون يَقْصرون هذا المصطلح على كوكبَي المشتري وزحل؛ لأنهما يحتويان على كمٍّ من الغازات أكثر من الكوكبين الآخرين، بالرغم من أن كلًّا من هذين الكوكبين الآخَرَين يحتوي على كمٍّ من الغازات يزيد على كتلة كوكب الأرض غازًا.

يعرض الشكل رقم ١-١ خريطةً للمجموعة الشمسية، موضِّحًا عليها مدارات الكواكب وفقًا لمقياس الرسم، باستثناء مدارَي الزهرة وعطارد؛ إذ هما بالِغَا الصغر لدرجة لا تسمح بتضمينهما في الشكل. تم عرض جزء من مدار بلوتو؛ لأن ذلك سيفيد في مناقشة لاحقة. ثمة شيء لم أذكره بعدُ، لكن من دونه لا يمكن رسم تلك الخريطة؛ وهذا الشيء هو أن المدارات الكوكبية تقع جميعها في نفس المستوى تقريبًا. ومقارنة بمدار كوكب الأرض، الذي يمثل مستوًى مرجعيًّا مناسبًا يُعرف باسم «دائرة الكسوف»، يميل مدار بلوتو بمقدار ١٧٫١ درجة، ومدار عطارد بمقدار ٧ درجات مئوية، ومدار الزهرة بمقدار ٣٫٤ درجات، ومدارات جميع الكواكب الأخرى بالمجموعة الشمسية بمقدار يقل عن ٣ درجات مئوية.

عندما يقترب بلوتو من الحضيض، يكون داخل مدار نبتون، لكن من المستبعد أن يتصادما؛ فلكلٍّ ميله المداري، واختلاف هذا الميل يمنع مساريهما من أن يتقاطعا. وعلاوة على ذلك، دائمًا ما يكون نبتون في الجانب المقابل من الشمس عندما يمر بلوتو داخل مدار نبتون. وما يجعل هذا الأمر ممكنًا أن كل ثلاث دورات لكوكب نبتون حول الشمس تُقابِلها دورتان بالضبط لكوكب بلوتو حولها. وتُعرف هذه العلاقة بالرنين المداري ٣:٢.

وإضافة إلى وقوع المدارات في نفس المستوى تقريبًا، فجميع الكواكب تسلك نفس الطريق حول الشمس؛ فهي تدور عكس اتجاه عقارب الساعة كما يُرى من نقطة رصد تخيلية أبعد بكثير من القطب الشمالي لكوكب الأرض. وتظهر الحركة عكس عقارب الساعة أيضًا في الاتجاه الذي يدور فيه كل كوكب — باستثناء كوكبَي الزهرة وأورانوس — حول محوره. ولأن الحركة عكس عقارب الساعة شائعةٌ جدًّا، يُطلَق عليها «الحركة الطبيعية». والحركة المدارية للكوكب أو حركة دورانه حول محوره التي تكون في اتجاه عقارب الساعة يُنظر إليها باعتبارها حركة للخلف، ويطلق عليها «الحركة العكسية».

وباستثناء أورانوس، يكون المحور الذي يدور حوله كل كوكب أقل ٣٠ درجة من أن يكوِّن زاوية قائمة مع مستواه المداري. وعطارد كوكب شبه «مثالي»؛ حيث إنه يميل بمقدار لا يتجاوز ٠٫١ درجة، في حين يميل محور الأرض بمقدار ٢٣٫٥ درجة. ويتباين



شكل ١-١: خريطة للمجموعة الشمسية تُبيِّن المدارات الكوكبية بالأحجام النسبية الصحيحة. والمدارات ليست ذات لاتراكزية كبيرة؛ ومن ثم لا يمكن عمليًّا التفريق بين شكلها وشكل الدوائر على ما يبدو. والدائرة غير المسماة الموجودة داخل مدار المريخ هي مدار الأرض وليست الشمس! لم يتم تضمين مدارَي الزهرة وعطارد نظرًا لصغرهما الشديد. إن بلوتو ليس كوكبًا، لكن تم تضمين مداره في الشكل لأنه يمثل عددًا كبيرًا من الأجرام الصغيرة الموجودة فيما وراء مدار نبتون.

الاتجاهُ الذي يشير إليه محور كوكبٍ ما، وكذلك مقدارُ الميل عند قياسهما على مدى عشرات الآلاف من السنين، لكنهما ثابتان فعليًّا على المقياس الزمني لمدار واحد. وميل المحور هو المسئول عن وجود فصول السنة على ظهر الكواكب؛ ففي الأرض يحدث الصيف في نصف الكرة الشمالي خلال جزء المدار الذي يميل عنده الطرف الشمالي من محور الأرض «نحو» الشمس، والشتاء الشمالي يحدث بعد ستة شهور من هذا عندما تكون الأرض على الجانب الآخر من الشمس، بحيث يميل الطرف الشمالي للمحور «بعيدًا» عن الشمس. ومن الكوكبين اللذين لا يتوافقان في درجة الميل، يميل محور الزهرة بمقدار ٢٫٧ درجة فقط، لكنه يدور ببطء شديد في الاتجاه العكسي (ما يجعل يومه يساوي ١١٦٫٧ يومًا من أيام الأرض) في حين يميل محور أورانوس بمقدار ٨٢٫١ درجة بدوران عكسي سريع. الأرجح

أن أورانوس قد عانى كارثة قلبته رأسًا على عقب، فبعد أن كان قد بدأ بدوران طبيعي في عكس اتجاه عقارب الساعة، انحرف بمقدار ٩٧٫٩ درجة (٩٧٫٩ درجة هي ناتج ١٨٠ درجة مطروحًا منها ٨٢٫١ درجة). وهذا يمكن أن يفسر الوضع الحالي دون الحاجة إلى حدث منفصل يفسر انعكاس اتجاه دورانه.

(٣-٣) أقمار الكواكب

جميع الكواكب تتبعها أقمار باستثناء عطارد والزهرة. وهذه الأقمار أجرام أصغر حجمًا تكون قريبة بالقدر الذي يكفي لأن تدور حول الكوكب بدلًا من الشمس. في الواقع، يدور كلٌّ من الكوكب والقمر التابع له حول مركز الكتلة المشترك بينهما (أو «محور الثقل»)، لكن الكواكب أضخم بكثير من أقمارها؛ لدرجة أن مركز كتلتها يقع داخل الكواكب نفسها، وعادةً ما يكون من المناسب تمامًا النظر إلى الأقمار على أنها تدور حول كواكبها. وتقع مدارات معظم الأقمار بالقرب من المستوى الاستوائي لكوكبها، وجميع الأقمار الضخمة تقريبًا تدور في مدارات عكس اتجاه عقارب الساعة؛ أي إنها تدور في نفس اتجاه دوران كوكبها.

والقمر الذي يتبع كوكب الأرض حالة استثنائية؛ لأنه ضخم نسبيًّا مقارنة بكوكبه؛ حيث يبلغ قطره ٢٧٪ من قطر الأرض، و١٫٢٪ من كتلتها. وبالمصادفة، حجم القمر وبُعده عن الأرض يبدوان نفس حَجم وبُعد الشمس عنها؛ وهذا لأن الشمس أضخم بكثير، لكنها في ذات الوقت أكثر بعدًا؛ وعندما يمر القمر بالضبط بين كوكب الأرض والشمس، فإنه يحجب قرص الشمس؛ مما يُسبِّب كسوفًا شمسيًّا. ولو كان مدار القمر حول الأرض على نفس المستوى بالضبط مع مدار الأرض، لَحدث كسوف شمسي كل دورة قمرية حول الأرض (أي كل شهر)، لكن مدار القمر يميل بزاوية ٥٫٢ درجات نحو دائرة الكسوف؛ ومن ثَمَّ فإن حالات الكسوف الشمسي نادرة، لا تحدث إلا عندما يتصادف مرور القمر بين الأرض والشمس عند نقطة من النقطتين اللتين يعبر عندهما مدار القمر دائرة الكسوف. كان تفسير الطبيعة الدورية لهذه الأحداث والتنبُّؤ بالوقت الذي يمكن أن تحدث فيه حالات كسوف شمسي (رغم عدم التمكُّن من فَهْم أسبابها فهمًا تامًّا) أحد الإنجازات العظيمة لعلماء الفلك البابليين منذ نحو ٢٦٠٠ عام. وحالات خسوف القمر التي تحدث عندما يمر القمر في ظل الأرض تخضع لنفس الدورة، لكنها أكثر شيوعًا؛ لأن ظل الأرض أكبر على نحو ملحوظ من القمر.

يتبع كوكبَ المريخ قمران صغيران، بينما يتبع كوكب المشتري أربعة أقمار يتجاوز قطرها ٣ آلاف كيلومتر (وهي الأقمار الأربعة التي اكتشفها جاليليو)، إضافة إلى ٥٩ قمرًا آخر — وفقًا لأحدث المعلومات — يقل قطرها عن ٢٠٠ كيلومتر (معظمها أقل من ٤ كيلومترات). ولكوكب زحل عدد مماثل من الأقمار، بالرغم من أن واحدًا فقط من تلك الأقمار هو الذي يضاهي أكبر قمر تابع لكوكب المشتري. ويتبع كوكبَ أورانوس خمسةُ أقمار بقطر يتراوح بين ٤٠٠ و١٦٠٠ كيلومتر، و٢٢ قمرًا معروفًا أصغر حجمًا. ويتبع كوكبَ نبتون قمرٌ ضخم واحد، واثنا عشر قمرًا معروفًا صغير الحجم. ومعظم الأقمار الخارجية الصغيرة (بقطر يبلغ بضعة كيلومترات) التي تتبع كوكب المشتري وزحل تم اكتشافها باستخدام تليسكوبات (وليس عن طريق إحدى المركبات الفضائية)، وبالتأكيد لا يزال هناك المزيد من الأقمار الصغيرة التي تتبع الكواكب العملاقة بانتظار أن يتم اكتشافها، لا سيما تلك التي تتبع أورانوس ونبتون؛ حيث هناك صعوبة كبيرة في استخدام التليسكوب لاكتشافها؛ وذلك لسببين؛ هما: أنهما أكثر بعدًا عن الشمس؛ ومِن ثَمَّ أقل سطوعًا، كما أنهما أكثر بعدًا عن كوكب الأرض؛ ومِن ثَمَّ سيبدوان خافتين حتى إذا كانت درجة سطوعهما جيدة.

والأقمار الأكبر حجمًا أكثر إثارة للاهتمام من الناحية الجيولوجية — وسوف أذكر المزيد عنها لاحقًا — لكن جميع الأقمار مفيدة لعالم الكواكب؛ لأنها تساعد في تحديد خصائص الكواكب التي تتبعها هذه الأقمار. والفترة المدارية للقمر التابع لا تعتمد إلَّا على متوسط المسافة بين القمر ومركز الكوكب وكتلتهما المشتركة (التي يمكن حسابها باستخدام تفسير نيوتن لقانون كبلر الثالث بمنظور الجاذبية). ولأن الأقمار التابعة أصغر بكثير، تكون كتلة الكوكب هي المهيمنة على نحو شبه تامٍّ، بنفس الطريقة التي تعتمد بها مدارات الكواكب حول الشمس على المسافة والكتلة الشمسية.

(٣-٤) الكويكبات والأجرام الوراء نبتونية والمذنبات

يتناول هذا الكتاب موضوع الكواكب وليس المجموعة الشمسية بأكملها، لكن تجدر بنا الإشارة إلى أن الأجرام الأخرى تفوق كثيرًا في عددها عددَ الكواكب وأقمارها التابعة معًا، بالرغم من أن هذه الأجرام صغيرة الحجم، وإجمالي كتلتها ضئيل نسبيًّا. وبالرغم من أن علماء الكواكب أدركوا أن الفروق بين تلك الأجرام «الثانوية» غير واضحة إلى حدٍّ ما، فإنه يمكن تقسيمها إلى ثلاث فئات فضفاضة: الكويكبات، والأجرام الوراء نبتونية، والمذنبات.

تتباين الكويكبات في حجمها؛ حيث يبلغ قطر أضخمها ٩٥٠ كيلومترًا (وهو قطر كويكب سيريس)، وليس هناك حد أدنى لهذا الحجم. وقد تم اكتشاف كويكبات بقطر يبلغ بضع عشرات الأمتار وهي تمر قريبًا من كوكب الأرض، ويمكن العثور على بقايا كويكبات أصغر حجمًا سقطت على الأرض، وذلك على هيئة نيازك. وكان يُظن سابقًا أن الكويكبات عبارة عن بقايا كوكب مُدمَّر، لكننا نعتقد الآن أن الكويكبات لم تنتمِ قَطُّ لجرم بحجم كوكب. والكتلة الإجمالية لجميع الكويكبات هي — على الأرجح — أقل من واحد على ألف من كتلة الأرض. ومن الواضح أن بعض الكويكبات قد تعرضت لتصادمات متبادلة، كما يتضح من أشكالها غير المنتظمة.

ومن دون استثناءات، فإن الحركة المدارية للكويكبات تكون في عكس اتجاه عقارب الساعة. ومعظم الكويكبات لديها ميل مداري يقل عن ٢٠ درجة، لكن اللاتراكزية تكون أكبر عادةً مقارنةً بالكواكب. وتقع مدارات معظم الكويكبات بين مدارَي المريخ والمشتري (وهو ما يُعرف باسم «حزام الكويكبات»)، لكن بعضًا منها يقترب كثيرًا من الشمس، ويمر داخل مدار كوكب الأرض، بل وحتى (في عدد من الحالات) داخل مدار كوكب عطارد. هناك بضعة كويكبات يُعرف أنها تدور فيما وراء زحل. ومثل النيازك المشتقة منها، تتميز معظم الكويكبات بطبيعة صخرية كربونية، لكن بعضًا منها مُكوَّن من حديد ونيكل. وبقدر ما يتوافر لدينا من معلومات، غالبًا ما يكون تركيب الكويكب أقل صخرية، وأكثر كربونية، وأكثر جليدية في نهاية المطاف كلما ابتعد عن الشمس.

ووراء مدار نبتون، وتحديدًا على مسافة من الشمس تتراوح بين نحو ٣٠ و٥٥ وحدة فلكية، يشيع وجود أجرام جليدية صغيرة الحجم، وهناك العديد منها التي تتجاوز من حيث الحجم أكبر الكويكبات. وهذه المنطقة عادةً ما يُطلق عليها «حزام كايبر»، الذي يحمل اسم العالم الأمريكي من أصل هولندي جيرارد كايبر، الذي تنبأ به في عام ١٩٥١ باعتباره منطقة تتجمع فيها الكتل الجليدية منذ نشوء المجموعة الشمسية. وقد أشار عالم أيرلندي — يُدعى كينيث إدجورث — إلى نفس هذا الاستنتاج في دورية مغمورة عام ١٩٤٣؛ لذا يفضِّل البعض أن يُطلق على هذا الحزام اسم «حزام إدجورث-كايبر». وأول جرم اكتُشف في حزام كايبر وتميَّز بتلك الخصائص عُثر عليه عام ١٩٩٢، لكن عدة مئات من تلك الأجرام قد تم اكتشافه الآن، وأصبح واضحًا أن بلوتو يجب أن يصنف على أنه واحد منها. والأجرام المشابهة التي لها حضيض لا يتجاوز مدار نبتون كثيرًا، لكنها تبلغ نحو ١٠٠ وحدة فلكية في أوجها، يُطلق عليها أجرام «القرص المبعثر». وأجرام

القرص المبعثر إلى جانب حزام كايبر يشكلان عائلة يُطلق عليها «الأجرام الوراء نبتونية»، وجميعها تدور في مدارات في عكس اتجاه عقارب الساعة. ومن المرجح أن الكتلة الإجمالية للأجرام الوراء نبتونية تبلغ نحو ٢٠٠ ضعف الكتلة الإجمالية لحزام الكويكبات (أي خُمس كتلة كوكب الأرض). وإجمالًا، ربما يوجد نحو ١٠٠ ألف جرم يزيد حجمها على ١٠٠ كيلومتر. اكتُشف أحد أجرام القرص المبعثر عام ٢٠٠٥ وأُطلق عليه إريس، الذي يبدو أنه أكبر على نحو طفيف من بلوتو. ومما يزيد من درجة تأكدنا من كتلتيهما أن كليهما لديه أقمار تابعة بمدارات موثقة جيدًا، تشير إلى أن كتلة إريس أكبر من كتلة بلوتو بنسبة ٢٨٪.

المذنَّبات معروفة منذ القدم؛ لأن المذنَّب يمكن أن يظهر ظهورًا خاطفًا ومثيرًا بفضل تطويره لذيلٍ من الغاز والغبار يمكن أن يمتد عبر السماء، عندما يمر المذنب قريبًا من الشمس. ومع ذلك، فإن الجزء الصلب من المذنب هو مجرد كتلة من جليد غباري (كثيرًا ما توصف بأنها «كرة الثلج القذرة»)، والتي لا يتجاوز قطرها بضعة كيلومترات في معظم الأحيان. ويقضي المذنب معظم وقته بعيدًا عن الشمس، ولا يتشكل لديه ذيل إلا عندما يمر على مقربة كافية من الشمس تعمل على إحمائه. ونادرًا ما يحدث هذا؛ لأن المذنبات لها مدارات ذات لاتراكزية كبيرة، ويقع حضيضها عادةً داخل مدار كوكب الأرض، لكن أوجها يقع قريبًا من مدار المشتري أو وراءه. تأتي بعض المذنبات من مكان بعيد جدًّا لدرجة أن مداراتها تشبه القطع المكافئ (قطع ناقص طويل على نحو غير متناهٍ)، ولا تمر قريبًا من الشمس سوى مرة واحدة خلال تاريخها. وهذا النوع يُطلق عليه «المذنبات غير الدورية» (أي المذنبات ذات الفترات المدارية الطويلة)، وقد تم إزاحتها على ما يبدو من غطاء — لم تحدَّد معالمه جيدًا بعدُ — يحيط بالشمس على بعد ٥٠ ألف وحدة فلكية يُعرف باسم «سحابة أورط». وعلى النقيض، نشأت «المذنبات الدورية» (أي المذنبات ذات الفترات المدارية القصيرة) على الأرجح باعتبارها أجرام القرص المبعثر التي تم تشتيتها في مدار لاتراكزي بمسافة حضيض صغيرة عن طريق الاقتراب بشدة من جِرم آخر. والمذنبات التي لها فترات مدارية تبلغ مئات السنين يظل أوجها في القرص المبعثر، لكن الأوج يمكن أن يُزحزح ليقترب من الشمس نتيجة لاقتراب المذنب بشدة من كوكب عملاق. على سبيل المثال، مذنب هالي له أوج قريب من مدار نبتون، وفترة مدارية تبلغ ٧٥ سنة، في حين أن مذنب إنكي له أوج قريب من مدار المشتري، وفترة مدارية تبلغ ٣٫٣ سنوات فقط. وتفقد المذنبات من كتلتها عن طريق إطلاق ما بها من غازات في كل مرة تعمل حرارة

الشمس على إحمائها؛ لذا بعد عبور المذنب عددًا يقل عن ألف حضيض، فإنه يُختزل — على الأرجح — إلى كتلة خاملة من الصخر الخالي من الجليد والغبار، ويصعب تمييزه حينئذٍ عن الكويكب.

وكما يمكنك أن تتوقع استنادًا إلى مصدرها، فإن المذنبات «الدورية» تدور في مدارات في عكس اتجاه عقارب الساعة، وغالبًا ما تكون قريبة من دائرة الكسوف. بيْدَ أن مثل هذا التقييد لا ينطبق على المذنبات غير الدورية التي يمكن أن تميل مداراتها على نحو كبير، أو حتى تنعكس حركة دورانها.

(٣-٥) ما تعريف الكوكب؟ وكيف أُسقط بلوتو من قائمة الكواكب؟

كان بلوتو أول جِرم وراء نبتونيٍّ اكتُشف، وذلك في عام ١٩٣٠. وحتى بعد أن أصبح واضحًا صغر حجم بلوتو (وصغر كتلته لاحقًا بفضل اكتشاف أكبر الأقمار التابعة له عام ١٩٧٨)، ظل الناس يعتقدون أن بلوتو هو الكوكب التاسع في كواكب المجموعة الشمسية، ولكن حينما تزايد عدد الأجرام المكتشفة في حزام كايبر ليصل إلى مئات الأجرام، ونافس العديد منها بلوتو في حجمه، أصبح من الصعوبة تصنيف بلوتو على أنه كوكب، وتصنيف أجرام حزام كايبر الأخرى على أنها شيء مختلف. وعندما تم التأكد من أن كتلة وحجم الجرم إريس أكبر — على الأرجح — من بلوتو، كان من المنطقي إما أن تُسمى جميع الأجرام الوراء نبتونية كواكب، وإما ألَّا يُطلق على أيٍّ منها هذا الاسم. مع ذلك، جادل الكثير من الناس من أجل الإبقاء على بلوتو كوكبًا على أساس عاطفي أو تاريخي.

ومما أعاق عملية اتخاذ القرار أن مصطلح «كوكب» لم يتم قط تعريفه تعريفًا تامًّا. وفي النهاية، وفي اجتماع للاتحاد الفلكي الدولي، عُقد في براغ عام ٢٠٠٦، أثير خلاله جدل كبير، صوتت الوفود المشاركة على قبول بعض التعريفات التي سوَّت المشكلة إلى حد كبير. لم يَثُرْ جدل حول قاعدتين أساسيتين يتم على أساسهما اعتبار الجرم كوكبًا؛ أولًا: قرر الاتحاد الفلكي الدولي أن الكوكب يجب أن تكون له كتلة كافية حتى تتمكن جاذبيته الذاتية من التغلب على «قوى الأجرام الصلبة»؛ كي يتمتع بشكل يتَّسم بتوازن هيدروستاتيكي (شبه دائري)، وثانيًا: قرر أن الكوكب يجب أن يدور في مدار حول الشمس. وهذه القاعدة الثانية تستبعد الأقمار الكبيرة مثل القمر الأرضي من قائمة الكواكب.

أما القاعدة الثالثة فكانت حاسمة؛ فهي تنص على أنه كي يُعدَّ الجِرمُ كوكبًا، يجب ألا يكون في محيطه حول مداره أي جرم سوى أجرام أصغر حجمًا بكثير منه. وهذا

هو الشرط الذي لا يستوفيه بلوتو؛ فهناك أجرام أكبر منه في محيطه؛ لأن محيطه هذا يشترك معه فيه العديد من الأجرام ذات الأحجام المشابهة لحجمه. وفي واقع الأمر، يشترك معه فيه أيضًا كوكب نبتون الأكثر ضخامة بكثير. أما نبتون، فتنطبق بالفعل عليه تلك القاعدة؛ لأنه أضخم آلاف المرات من أي شيء آخر في نفس المنطقة المدارية (مثل بلوتو).

وبعد أن أخذ الاتحاد الفلكي الدولي الخطوة الجريئة والمنطقية تمامًا باستبعاد بلوتو من قائمة الكواكب، يبدو أنه قد ندم فورًا على تلك الخطوة، ولم يكتفِ بابتكار فئة بل فئتين جديدتين لينتمي إليهما بلوتو؛ ففي اجتماعه المنعقد في براغ عام ٢٠٠٦، ابتكر مصطلحًا جديدًا هو «الكوكب القزم»، الذي عُرِّف بأنه: «جِرم سماوي يدور حول الشمس، وله كتلة كافية تسمح لجاذبيته الذاتية بالاحتفاظ بشكله شبه الدائري، وتوجد أجرام سماوية أكبر منه حجمًا بكثير في محيطه؛ وليس قمرًا.» وتحديدُ ما إذا كان شكله شبهَ دائري أم لا مِن على بُعد أمرٌ صعب، كما أنه يثير جدلًا، لكن الاتحاد الفلكي الدولي بتبنِّيه هذا التعريف ميَّز بلوتو وإريس وسيريس (أكبر الكويكبات) بأن أُطلق عليها «الكواكب القزمة». في ذلك الحين، تأكد تصنيف الأجرام الوراء نبتونية الضخمة الأخرى باعتبارها كواكب قزمة عندما قيس حجمها على النحو الملائم. وبالطبع في عام ٢٠٠٨، اجتاز جرم — ينتمي لحزام كايبر، ويطلق عليه ميكميك، ويقدَّر حجمه بنحو ثلثي حجم بلوتو — اختبارَ الشكل الخاص بالكواكب القزمة، واعتُرف بأنه الكوكب القزم الرابع، وأعقبه كوكب قزم خامس أطلق عليه هاوميا.

على ما يبدو أن الاتحاد الفلكي الدولي ندم على وضع أجرام صغيرة الحجم مشابهة لبلوتو في نفس القائمة التي وضُع فيها سيريس، وفي عام ٢٠٠٨، ابتكر الاتحاد مصطلحًا جديدًا هو «البلوتيات» (أشباه بلوتو) للدلالة على الكواكب القزمة الوراء نبتونية. ومِن ثمَّ، فإن سيريس هو الكوكب القزم الوحيد الذي لا يشبه بلوتو، وبالتأكيد لم يُكتشف أي كويكب جديد بقدر من الضخامة تسمح له بالانضمام إلى هذا الكويكب في هذه الفئة، بيْد أنه يوجد — على الأرجح — كثير من الأجرام الوراء نبتونية الضخمة غير المكتشفة أو الموثقة على نحو غير ملائم، التي سوف تنضم إلى بلوتو وإريس وميكميك وهاوميا باعتبارها شبيهة ببلوتو، وباعتبارها «أيضًا» كواكب قزمة. وبالمناسبة، سُمي إريس (وضعًا في الاعتبار الجدل الذي أثاره) على اسم إلهة من آلهة الإغريق القدماء؛ وهي إلهة النزاع، في حين سُمي ميكميك وهاوميا على اسم إلَهَتَيِ الخصوبة في جزر المحيط الهادي.

(٤) كيف حدث كل هذا؟

(٤-١) نشأة الكواكب

حتى وقت قريب، كان من الممكن الاعتقاد بأن الكواكب نادرة في الكون، لكن يبدو واضحًا الآن أن الكواكب ناتج ثانوي معتاد يَظهر إلى الوجود نتيجة تكوُّن النجوم؛ ومِن ثَمَّ فإن وجود مجموعتنا الشمسية ناتج عن نشوء الشمس نفسها.

ويُعتقد أن النجم يتكون عندما تنكمش سحابة بين نجمية شاسعة — تكون مكوَّنةً في الأساس من الهيدروجين الذي يكون ممزوجًا ببضعة غازات أخرى وجسيمات دقيقة صلبة تُعرف بالغبار — تحت تأثير جاذبيتها الذاتية. وبينما تنكمش السحابة، تصبح معظم المادة مركَّزة في المَرْكز، في جرم يزداد سخونة بسبب طاقة الجاذبية المتحولة إلى حرارة بفعل عملية السقوط. وفي النهاية، ترتفع درجة الحرارة والضغط المركزي بشكل بالغ، فتبدأ نويات الهيدروجين في الاندماج معًا لتكوين الهليوم، وفي هذه المرحلة يمكن أن يُسمى الجرم المركزي نجمًا. وتنشأ الكواكب من بعض المادة المتخلِّفة خلال المراحل النهائية من تلك العملية. ويسبب الاحتفاظُ بالعزم الزاوي تسريعَ أيِّ دوران مبدئي طفيف للسحابة خلال عملية الانكماش، والمادة غير الداخلة في تكوين النجم تصبح مركَّزة في هيئة قرص في المستوى الاستوائي للنجم، وتدور في نفس اتجاه هذا النجم.

هذا القرص الدوار هو الذي تتشكل فيه الكواكب. والسديم الشمسي هو القرص الدوار الذي نشأت منه مجموعتنا الشمسية، وكلمة السديم تعني السحابة، ويستخدمها علماء الفلك للدلالة على أي كتلة ضخمة من الغاز و/أو الغبار في الفضاء. ثمة أسباب قوية للاعتقاد بأن السديم الشمسي كان يتكون من نحو ٧١٪ هيدروجين، و٢٧٪ هليوم، و١٪ أكسجين، و٠,٣٪ كربون، و٠,١٪ لكلٍّ من النيتروجين والنيون والمغنيسيوم والسليكون والحديد. ويكاد يكون كلُّ الغبار الأصلي الموجود في السديم الشمسي قد تبخَّر بفعل الحرارة التي انبعثت من الشمس في بداياتها، لكن سرعان ما أصبحت الظروف في السديم باردة بما يكفي لتكاثف حبيبات غبارية جديدة، في صورة مركَّبات وليس عناصر، ناتجة عن عملية اتحاد كيميائي. ولم تحدث عملية اتحاد للهليوم ليشكِّل مركَّبات كيميائية؛ ومن ثَمَّ فإن أكثر المركبات وفرة، التي يمكن أن تتكاثف، تشتمل إما على الهيدروجين وإما على الأكسجين.

وبفضل العناصر المتوفرة، ودرجة الحرارة والضغط الموجودين في السديم، استطاع الأكسجين أن يتَّحد مع السليكون ومعادن مختلفة ليكوِّن مجموعة من المركبات التي

تُعرف باسم السليكات في الجزء الداخلي من السديم. وهذه معادن شائعة في كوكب الأرض تتبلور عندما يبرد الصخر المنصهر، لكنها نشأت مباشرةً في السديم من الغاز. واندمج الهيدروجين مع جسيمات صلبة فقط عندما كانت درجة الحرارة منخفضة بما يكفي لتكوين مركبات حاملة للهيدروجين، ويبدو أن هذا قد حدث على بُعد نحو ٥ وحدات فلكية من الشمس. عند هذا الخط — الذي يطلق عليه «الخط الجليدي» — ووراءه، يمكن أن يتكاثف الماء (الذي يتكون من الهيدروجين والأكسجين) ليصبح ذرات ثلجية. وبالاتجاه بعيدًا عن الشمس، تكوَّنت المركبات الأكثر تطايرًا؛ حيث اتحد الهيدروجين مع الكربون لتكوين الميثان، ومع النيتروجين لتكوين الأمونيا، كما اتحد الكربون مع الأكسجين لتكوين أول أو ثاني أكسيد الكربون. على بُعد نحو ٣٠ وحدة فلكية، كانت هناك درجة من البرودة تكفي لتكاثف النيتروجين على هيئة جسيمات صلبة من النيتروجين النقي. من العجيب أن ثمة كلمةً ما في علوم الكواكب تستخدم للتعبير عن أي مادة صلبة تتكون من الماء أو الميثان أو الأمونيا، أو أول أكسيد الكربون، أو ثاني أكسيد الكربون، أو النيتروجين (أو، في واقع الأمر، أيٍّ مزيج منها)، وهي كلمة «ثلج»؛ للدلالة على أوجُه التشابه في الأصل والخواص؛ وهذا يعني أنه لِتجنُّب الغموض، يتعين على علماء الكواكب أن يستخدموا مصطلح «ثلج مائي» عند الإشارة تحديدًا إلى الماء المتجمد؛ وهو نوع من التعقيد نادرًا ما يظهر عند الحديث عن كوكب الأرض؛ حيث تكون درجات الحرارة مرتفعة جدًّا لدرجة تمنع تجمُّد المركبات الأكثر تطايرًا من الماء على نحو طبيعي.

حدث التكاثف بحيث إن حبيبات الغبار الأولى — وهي ذرات دقيقة تتكون من سليكات قريبة من الشمس وثلوج (إضافة إلى بعض السليكات المتبقية) أبعد عن الشمس — لم تنشأ على هيئة ذرات كثيفة صلبة؛ فعوضًا عن ذلك، كانت لها أشكال «مرنة» معقدة، وعندما كان يصطدم بعضها مع بعض، غالبًا ما كانت تلتصق معًا بدلًا من أن ترتدَّ مبتعدةً كلٌّ منها عن الأخرى. وخلال فترة تبلغ نحو عشرة آلاف سنة أعقبت بدء عملية التكاثف، يمكن أن تكون الجسيمات قد تحولت إلى كريات يبلغ قطرها سنتيمترًا واحدًا من خلال التأثيرات المجمعة للتكاثف والتراكم (أي التصاق الجسيمات معًا) عند اصطدامها معًا. وربما بعد مرور ١٠٠ ألف سنة، تكون المجموعة الشمسية قد احتوت على حشود من الأجرام التي يبلغ عرضها نحو ١٠ كيلومترات أُطلق عليها «الكواكب المصغرة». وهذه الأجرام كانت تدور جميعها حول الشمس في نفس الاتجاه المعاكس لاتجاه عقارب الساعة، وكانت محاطةً في ضباب منتشر تكوَّن من الغاز والغبار المتبقيين.

نحن نعلم منذ متى حدث هذا؛ لأن بعض هذه الحبيبات الأولى ظل باقيًا كما هو داخل النيازك. ويمكننا قياس نواتج التحلل الإشعاعي داخلها لتحديد عمرها، وهو رقم جدير بأن يُذكر: ٤٥٦٧ مليار سنة. وأكثر النيازك «بدائية»، والتي هي عبارة عن بقايا كواكب مصغرة، لم تعانِ قَطُّ من السخونة أو التغيير، ويطلق عليها «الكوندريتات الكربونية»، وهي أهم الأدلة المباشرة على الظروف السائدة في المجموعة الشمسية في بداية نشأتها.

حتى هذه المرحلة، حدثت التصادمات في الأساس عن طريق الصدفة، لكن بمجرد أن بلغت الكواكب المصغرة نحو ١٠ كيلومترات من حيث الحجم، استطاعت قوة الجاذبية الأشد للكواكب المصغرة الأكبر حجمًا أن تمارس تأثيرها. عانت هذه الكواكب عددًا أكبر من التصادمات؛ ومن ثَمَّ فإن معدل نموها كان أسرع مقارنةً بغيرها. وخلال بضع عشرات الآلاف من السنين، نمَتْ أكبر الكواكب المصغرة بحيث أصبح قطرها ألف كيلومتر أو نحو ذلك، مستحوذة على معظم الكواكب المصغرة الأصغر حجمًا خلال ذلك.

وقد أُطلق على هذه الكواكب المصغرة الضخمة اسم جديد هو «الأجنَّة الكوكبية». وربما تَشكَّل بضع مئات منها في قلب المجموعة الشمسية. ربما كانت ضخمة بالقدر الذي يكفي لأن تجعلها جاذبيتها الذاتية تتخذ أشكالًا كروية. وربما كانت ساخنة بالقدر الذي يكفي داخليًّا لحدوث عملية انصهار، ما سمح للحديد بالغوص داخليًّا لتكوين لبٍّ مميز، لكن هذا ليس منطقيًّا بسبب ما حدث بعد ذلك.

وهذه الأجنة الكوكبية هي ما تَشكَّلت منه الكواكب الأرضية. والآن بعد أن اختفت أغلب الأجرام الصغيرة، لا يمكن أن يكون قد حدث نمو ملحوظ إلا عندما تصادَم جنينان كوكبيان معًا، وهذا التصادُم يُطلق عليه «اصطدام عملاق»، وهو يُطلِق قدرًا كافيًا من الحرارة لصهر الجرم المدمج الذي تَشكَّل عن طريق الاصطدام. تَخيَّلْ كرة من الصخر المنصهر شديدة السخونة لدرجة الاحمرار، باستثناء بعض الأجزاء الباردة الموجودة على سطحها، مع وجود «مطر» من قطيرات الحديد تستقر بداخلها عبر الماجما السليكية لتتراكم على اللب المركزي للصخرة. سوف يساعدك ذلك على تخيُّل حالة جنين كوكبيٍّ في أعقاب اصطدام عملاق.

هذا يفترض أن الاصطدام لا يحطم كلا الجِرْمينِ إلى شظايا، لكن سوف يُلقي دون شك بقدْرٍ معين من الحطام إلى الفضاء باعتباره مقذوفًا ناتجًا عن عملية التصادم. والأرجح أن هذا الأمر استغرق نحو ٥٠ مليون سنة لتشكيل كوكب بحجم الأرض عن طريق سلسلة من الاصطدامات العملاقة بين الأجنة الكوكبية. وبسبب عشوائية التصادمات

و«شجرة العائلة» المُعقَّدة لتصادُمات الاصطدام العملاق، التي حدثت بين الأجرام التي هي ذاتها تشكَّلت بفعل اصطدامات عملاقة؛ من غير المعقول النظر إلى أي جنين كوكبيٍّ في مرحلة مبكرة من هذه العملية باعتباره «كوكب أرض أوليًّا» أو «كوكب زهرة أوليًّا».

ووراء مدار المريخ، كان تأثير جاذبية كوكب المشتري الناشئ قويًّا بما يكفي لجعل الكواكب المصغرة الصخرية تدور في مدارات لا تراكزية، بحيث إن التصادمات المتبادلة كانت في أغلب الأحيان شديدة القوة لدرجة لا تسمح بحدوث نمو في الحجم عن طريق التراكم. وعوضًا عن ذلك، كان التفتُّت نتيجة شائعة؛ ومِن ثَمَّ فإن الأجنة الكوكبية الضخمة التي ربما كانت قد تصادمت في نهاية المطاف لتكوين كوكب أرضي خامس لم تكن قادرة على النمو هنا. اليوم، في هذه المنطقة، نجد معظم الكويكبات، وهي تمثل فقط قدرًا ضئيلًا من الكتلة التي كانت موجودة في ذلك المكان؛ فقد بعثر كوكب المشتري أغلبها في مدارات لا تراكزية على نحو واضح، بحيث إن معظمها اصطدم في نهاية المطاف مع كوكب المشتري، أو كوكب عملاق آخر، أو طُرد من المجموعة الشمسية تمامًا.

احتوت الأجرام التي تشكَّلت منها الكواكب العملاقة في داخلها على نسبة عالية من الجليد والصخور. وهناك، خلف «الخط الجليدي»، كانت الكواكب الناشئة تحتوي على مادة أكثر بكثير تعتمد عليها. إن دور تصادمات الأجنة الكوكبية بعضها مع بعض ليس مؤكدًا، وكذلك الحال بالنسبة للآليَّة التي اكتسبت بها قدرًا كبيرًا جدًّا من الغاز. تشير إحدى النظريات إلى أنه بعد أن تجاوزت كتلتها ١٠ أو ١٥ ضعفًا من كتلةِ كوكب الأرض، كانت قوة جاذبيتها تكفي لامتصاص كميات ضخمة من جميع الغازات التي ظلت موجودة في السديم المتبقي؛ ومِن ثَمَّ أصبحت نواتها الصخرية الجليدية محاطة بأغلفة غازية عميقة. ذهب تيار فكري آخر إلى أن حالة عدم ثبات الجاذبية في السديم أدَّت إلى نمو كل كوكب عملاق داخل عقدة كثيفة جدًّا؛ حيث احتُجز الغاز بطبيعة الحال حول الكوكب الناشئ.

حدث أيضًا انقسام في الرأي حول المعدلات النسبية لنمو الكواكب في الأجزاء الداخلية والخارجية من المجموعة الشمسية، ومن غير الواضح ما إذا كان كوكب المشتري تَشكَّل قبل أو بعد كوكبَيِ الأرض والزهرة. ومع ذلك، إذا كانت كواكب زحل وأورانوس ونبتون قد نمت بفعل التصادمات بين الأجنَّة الكوكبية، فإنها لا بد أن تكون قد نشأت على نحو أبطأ من كوكب المشتري؛ لأن التصادمات من المفترض أن تكون أقل حدوثًا مع الابتعاد عن الشمس.

انتهت عملية امتصاص الغاز من السديم عندما دخلت الشمس في مرحلة «تي تاوري»، التي سميت على اسم النجم «تي تاوري»، الذي يتعرض لهذه العملية اليوم. ولمدة ربما تبلغ نحو ١٠ ملايين سنة، حدث اندفاع قوي للغاز من النجم يُطلق عليه «رياح تي تاوري»، وهذا الاندفاع عصف بجميع ما تبقى من الغاز والغبار. ثمة سبب محتمل لوجود كمية من الغاز في أورانوس ونبتون تقل نسبيًّا عن الكواكب العملاقة الأخرى؛ وهو أن هذين الكوكبين استغرقا وقتًا أطول في النشوء، تاركَين وقتًا أقل لتجميع الغاز قبل أن تضع رياح تي تاوري نهاية لهذه العملية.

(٤-٢) الكواكب المهاجرة

ثمة مسألة أخرى أُثير الجدل حولها، وهي الطرق التي يمكن أن تتغير بها المدارات بمرور الزمن، وإلى أي مدًى يحدث هذا، لا سيما فيما يتعلق بالكواكب العملاقة. فإلى أن انتشر السديم الشمسي، من الوارد أن تكون قد أدت التفاعلات الجذبوية بين المادة السديمية والأجرام الدوارة الضخمة إلى إنقاص نصف قطر مداراتها على نحو تدريجي؛ مما جعل الأجنة الكوكبية والكواكب الناشئة تهاجر نحو الداخل. وبعد الانتشار السديمي، من الممكن أن تكون قد لعبت التفاعلات الجذبوية بين الكواكب والأجرام الأصغر حجمًا دورًا أكثر تأثيرًا؛ فالبعض يشير إلى فترة نصف مليار سنة أو ما شابه عندما حرَّك أبعد كوكب عملاق عن الشمس مدارات الكواكب المصغرة الجليدية النائية نحو الداخل؛ حيث من الوارد أن تكون قد دُفعت أكثر نحو الداخل نتيجة التفاعُل مع الكوكب العملاق التالي، واستمر الوضع على هذا المنوال إلى أن مرَّت قريبًا بالقدر الكافي من كوكب المشتري الذي دفعها نحو الخارج. وهذه الكواكب المصغرة الجليدية التي تم دفعها نحو الخارج يمكن أن تكون أصل سحابة أورط الحالية. لا بد أن يكون كوكب المشتري قد تحرك على نحو طفيف ليقترب من الشمس في كل مرة يدفع فيها جرمًا نحو الخارج. لكن على النقيض، من الوارد أن تكون الكواكب العملاقة الأخرى قد زُحزحت نحو الخارج في كل مرة حرَّك كوكبٌ منها كتلةً من الجليد نحو الداخل. وهذا السيناريو يتضمن تحرك المشتري نحو الداخل، في حين أن زحل وأورانوس ونبتون تحركت نحو الخارج. ومن الوارد حتى أن أورانوس ونبتون تبادلا أماكنهما (ما أتاح فرصة انحراف محور أورانوس ليصبح في وضعه الحالي). والأجرام الوراء نبتونية الحالية هي تلك التي ظلت وراء النطاق الذي اكتُسح خلال تحرُّك كوكب نبتون نحو الخارج.

أرجو ألا يتشكَّل لديك انطباع بأن مدار أي كوكب يمكن أن يتغير سريعًا أو على نحو كبير؛ فمزاعم أن كوكب الزهرة و/أو كوكب المريخ مرَّ قريبًا من الأرض خلال العصور التوراتية، التي أدَّت إلى إطلاق العديد من الخرافات، والتي حدثت خلالها العديد من الكوارث الطبيعية؛ مزاعم واهية تمامًا. وتحرُّكات الكواكب الخارجية التي ذكرتها حدثت ببطء شديد للغاية، ونتيجة للتفاعلات التراكمية مع الغاز السديمي، وفي ظل وجود أعداد هائلة من الأجرام الصغيرة التي لم تَعُد متوفرة.

لكن الكواكب وقوى جذبها المتبادلة تُغيِّران باستمرارٍ الشكل. وتشير نظرية الفوضى إلى أنه يستحيل التنبؤ بمواقع الكواكب لأكثر من بضعة ملايين السنين المستقبلية. ومع ذلك، يمكن التأكيد على أن المجموعة الشمسية مستقرة على نحو كافٍ بحيث إنه من المستبعد أن يتصادم كوكب، أو يُقذف به خارج المجموعة الشمسية خلال بضعة مليارات سنة قادمة؛ فنحن — على الأرجح — في أمان لمدة ٥ مليارات سنة على الأقل، وهو الوقت الذي يتوقع فيه علماء الفلك أن تنتفخ الشمس لتصبح عملاقًا أحمر اللون؛ ومِن ثَمَّ سوف تكون تحرُّكات المريخ أقل المشكلات التي سيواجهها ساكنو كوكب الأرض في المستقبل.

(٣-٤) كيف نشأت الأقمار التابعة للكواكب؟

الأرجح أنك لن تندهش الآن إذا قلت لك إنه لا توجد إجابة مباشرة للسؤال المتعلق بما إذا كانت الأقمار التابعة قد نشأت بطريقةٍ ما جنبًا إلى جنب مع كواكبها، أم أن هذه الكواكب اجتذبتها لاحقًا. والأقمار الضخمة التي تدور عكس اتجاه عقارب الساعة، والتي تتبع الكواكب العملاقة هي الأسهل في تسليط الضوء عليها؛ فيُعتقد أنها تشكَّلت داخل سحابة من الغاز والغبار تحيط بكل كوكب عملاق خلال نشأته، والتي هي أشبه إلى حدٍّ ما بنسخة مصغرة من السديم الشمسي. والأقمار الصغيرة التي تدور عكس اتجاه عقارب الساعة، والتي يبلغ حجمها بضعة كيلومترات، وتدور قريبًا من الكواكب العملاقة؛ هي — على الأرجح — بقايا أقمار أكبر حجمًا اقتربت بشدة وتفتتت. والأقمار الخارجية التابعة للكواكب العملاقة يدور أغلبُها في مدارات على نحو عكسي في اتجاه عقارب الساعة، وهذه — على الأرجح — أجرام اجتُذبت كانت قد بدأت على هيئة كويكبات، أو أجرام وراء نبتونية، أو نوات مذنبات.

يكاد يستحيل نظريًّا على كوكبٍ أن يأسر جرمًا مارًّا به في مدار حول نفسه؛ فالجرم الأصغر الزائر سوف يتأرجح وهو يمر بالكوكب بفعل قوة جذب الأخير، لكن ليس من السهل أن يتم الإبطاء من حركته بما يكفي لأن يُؤسر في مدار. ومع ذلك، إذا كان الجرم الزائر ثنائيًّا (أي مكوَّنًا من جرمين متشابهين)، فإن أحدهما يمكن أن يتم أسرُه بفعل نقل كمية الزخم إلى الجرم الآخر الذي سوف ينطلق بسرعة أكبر بعد التقارُب الشديد. ثمة تفسير حالي يَلقى استحسانًا فيما يتعلق بالقمر الضخم التابع لكوكب نبتون، الذي يدور على نحو عكسي في اتجاه عقارب الساعة، والذي يُعرف باسم ترايتون. وهذا التفسير مفاده أن ترايتون كان في السابق نصف جرم وراء نبتوني ثنائيًّا اقترب من نبتون. هذا يبدو مقبولًا؛ لأن العديد من الأجرام الوراء نبتونية معروف عنها أنها أجرام ثنائية، لكن عليك أن تلاحظ أن هذا لم يُفسِّر سبب وجود أقمار تابعة للكثير جدًّا من الأجرام الوراء نبتونية (والكويكبات أيضًا، في واقع الأمر) في المقام الأول.

ثمة تفسير مختلف للقمر التابع لكوكب الأرض، ويبدو أنه قد تكاثف من الحطام الذي أُلقي في مدار حول الأرض بفعل التصادم بين الأجنة الكوكبية من المجموعة التي نشأت منها كواكب الأرض. والقمران الصغيران التابعان لكوكب المريخ (فوبوس وديموس) هما كويكبان لا يزال أَسْرُهما في مدارين دائريين متقاربين أمرًا غير مفهوم.

(٥) التصادمات والنطاق الزمني لتكوين الفوهات

بالرغم من أن التصادمات بين الأجرام الكبيرة نادرة الحدوث جدًّا حاليًّا، لا يزال هناك عدد ضخم من الأجرام الصغيرة التي يمكن أن تتصادم مع كوكبٍ ما. وقبل نحو ٣٫٩ مليارات سنة (وهي حقبة أطلق عليها «القصف الكثيف المتأخر»)، كان معدل تصادم الكويكبات والمذنبات بالكواكب أعلى بكثير من معدله اليوم. والفوهات الصدمية في هذا العصر محفوظة جيدًا على سطح القمر (انظر الشكل رقم ١-٢)، بالرغم من أن تكوين الفوهات استمر بمعدل أبطأ منذ ذلك الحين. وتتكون الفوهة الصدمية على جرم صلب عندما يصطدم به شيءٌ ما بسرعة بضع عشرات الكيلومترات في الثانية. وتُحفر هذه الفوهات بفعل موجات صدمية تنبثق من نقطة التصادم. والفوهات دائرية الشكل باستثناء أمثلة نادرة تحدث عندما يصل الجرم الصادم بزاوية سقوط سافة.

هناك تسلسل هرمي متفق عليه لِبِنية الفوهات استنادًا إلى أقطارها، ويمكن أن يتم تمثيله تجريبيًّا وفي نماذج حاسوبية. وعلى سطح القمر يكون للفوهات، بدايةً من

تلك الميكروسكوبية الحجم إلى تلك التي يصل قطرها إلى ١٥ كيلومترًا، أشكالٌ دائرية مجوفة بسيطة. وبالنسبة للفوهات التي تصل أقطارها إلى ١٤٠ كيلومترًا، فإنها لا تصبح أعمق، لكن تكون لها أرضيات مسطحة، وعادة ما تتكون قمة مركزية عن طريق الارتداد بعد الحفر مباشرةً. هناك مثال جيد على هذا بالقرب من الجزء العلوي من الشكل رقم ١-٢. يكون للفوهات الأكبر حجمًا مجموعة من القمم المركزية، وتتخذ الفوهاتُ التي يزيد قطرها على ٣٥٠ كيلومترًا شكْلَ حلقتين تراكزيتين أو أكثر. وتحدث التحولات من نوع إلى آخر في الأقطار الأصغر إلى حدٍّ طفيف في الأجرام التي لديها قوة جذب أكبر.

وسِجِل تكوُّن الفوهات على كوكب الأرض لم يُحفظ على نحو جيد؛ لأنه كوكب نشط تسير فيه العمليات التي تمحو أو تُواري الفوهات تقريبًا بنفس معدل تكوُّن فوهات جديدة. ولحسن الحظ، تسمح لنا المناطق الشاسعة القديمة التي ما زالت موجودة على سطح القمر بحساب كثافة الفوهات الصدمية التي أعمارها معلومة لدينا، وذلك بفضل العينات التي يمكن تحديد أعمارها، والتي جلبتها إلى الأرض بعثة «أبوللو» المأهولة التي قامت بالهبوط على سطح القمر، وقد أكملت مهمتها عدة بعثات سوفييتية غير مأهولة، وجلبت هي الأخرى عينات لفحصها. بذلك، نعرف تاريخ القصف الكثيف المتأخر، وأيضًا متوسط المعدل الذي يؤثر به تكوين الفوهات على القمر منذ ذلك الحين. لا بد أن كوكب الأرض وقمره قد تعرَّضا لنفس العدد من الصدمات، وثمة مبررات جيدة تدفعنا للاعتقاد بأن هذا أيضًا ينطبق إلى حدٍّ ما على عطارد والزهرة والمريخ؛ ومِن ثَمَّ فتحديد أعداد الفوهات هو أفضل طريقة لدينا لتقدير الأعمار على أسطح الكواكب. وإذا كان عمر سطح معين يعتريه شيء من الشك، فمِن الأسلم عادةً أن نفترض أن السطح الذي لديه فوهات ذات كثافة أقل يكون أصغر عمرًا من السطح الذي لديه فوهات ذات كثافة أعلى.

في الوقت الحالي، يضرب كوكبَ الأرض سنويًّا نحو ١٠ آلاف نيزك يزيد وزنها على كيلوجرام واحد، لكن معظم هذه النيازك يكون ضئيل الحجم لدرجة تجعله غير قادر على تحمل المرور عبر الغلاف الجوي؛ حيث يسخن ويتفتت بفعل الاحتكاك. وحدوث تصادم بفعل نيازك يبلغ وزنها ألف كيلوجرام لا يحدث إلا نحو ١٠ مرات، ومتوسط الفاصل الزمني بين التصادمات التي تحدث بفعل أجرام يبلغ قطرها ١٥٠ مترًا (والتي يمكن أن تُحدث فوهة يبلغ عرضها نحو كيلومترين) يُقدَّر بنحو ٥ آلاف سنة. والأجسام الصادمة التي يبلغ قطرها كيلومترًا واحدًا تصل عشوائيًّا بمعدل مرة كل ٢٠٠ ألف سنة، وتثقب الغلاف الجوي وتمرُّ عبره، كما لو كان غير موجود من الأساس، ضاربةً الأرض بنفس



شكل ١-٢: منظر يغطي ٤٧٠ كيلومترًا من منطقة كثيفة الفوهات على سطح القمر. معظم هذه الفوهات يرجع تاريخها إلى نحو ٣٫٩ مليارات سنة مضت، وقد طُمست معالم الفوهات الأقدم منها. وكل فوهة تَشكَّلت بفعل تصادُم جِرم أصغر بنحو ٢٠ إلى ٣٠ مرة من الفوهة نفسها. ومن الوارد أن تكون أجزاء من الأرض قد بدتْ مشابهة في وقت من الأوقات.

سرعتها، وبذلك تشكل فوهة قطرها نحو ٢٠ كيلومترًا. والتصادمات الأضخم والأكثر تدميرًا تكون حتى أقل حدوثًا.

تؤثر التصادمات على كل جرم في المجموعة الشمسية، لكن لا تبقى الفوهات إلا حيثما يكون هناك سطح صلب وقلة في النشاط بحيث لا يُمحى أثرُها. وقد حالف المراقبين الحظُّ إذ اكتشفوا مجموعة من بقايا مذنَّب مُدمر قبيل تصادمها مع كوكب المشتري في يوليو ١٩٩٤. وقد شوهدت العديد من التصادمات، وترك كلٌّ منها ندبة بنية اللون في الغلاف الجوي للكوكب العملاق ظلت موجودة لبضعة أسابيع، كما حدث لندبة عُثر عليها في يوليو ٢٠٠٩ ظهرت بفعل تصادم لم يتم رصده.

(٦) الكواكب كمَواطن للحياة

لو لم يكن كوكب الأرض على بُعدٍ مريح من الشمس لما استطعت قراءة هذا الكتاب؛ لأن الحياة حينئذٍ ما كانت لتبدأ، ولم نكن لنتطور هنا حتى وإن وُجِدَت حياة على ظهرها. يتحدث العلماء عن «نطاق قابل للسكنى» حول كل نجم، على مسافة تكون فيها درجة الحرارة على سطح كوكبٍ ما مناسبة؛ ليست بالغة الارتفاع ولا بالغة الانخفاض بما يعوق وجود حياة فيها. وقياسًا على تفضيل جولديلوكس — في قصتها الشهيرة مع الدببة الثلاثة — لعصيدة الدبِّ الصغير (التي كانت درجة حرارتها «مناسبة تمامًا»)، يطلق أحيانًا على النطاق القابل للسكنى اسم «نطاق جولديلوكس». وفي هذا السياق، تعني عبارة «نطاق قابل للسكنى» مكانًا ما يُمكن أن تَنشأ وتستمر فيه الحياة من أي نوع، حتى وإن كانت مظاهرها تقتصر على الميكروبات البسيطة. وهي لا تعني ضمنًا أن هذه البيئة ستكون صالحة لسكنى البشر.

ولأن البشر بحاجة إلى ماء من أجل الحياة، فإن المنطقة القابلة للسكنى تتحدد عادة بناءً على المسافة التي تفصل الكوكب عن نجم معين، بحيث تكون درجة حرارة الكوكب مناسبة لتوفر الماء في حالته السائلة على ظهره. وتؤثر كثافة وتركيب الغلاف الجوي لكوكبٍ ما على درجة حرارة سطحه، لكن العامل الحاسم هو الحرارة التي تصل الكوكب من النجم. ووفقًا للتقديرات، فإن النطاق القابل للسكنى حول الشمس يمتد من نحو ٠٫٩٥ إلى ١٫٥ وحدة فلكية. وتضع هذه التقديرات كوكب الزهرة (٠٫٧٢ وحدة فلكية) داخل الحافة الداخلية للنطاق القابل للسكنى، في حين تضع كوكب المريخ (١٫٥٢ وحدة فلكية) على الحافة الخارجية لهذا النطاق. ومن المرجح أن تكون قد تزايدت الطاقة المنبعثة من الشمس تزايدًا طفيفًا منذ أن تكونت الكواكب؛ مما حرَّك النطاق القابل للسكنى نحو الخارج بمرور الوقت؛ ومن ثمَّ فإن احتمال وجود حياة على كوكب المريخ سيكون ضعيفًا، لكنه ليس مستحيلًا.

وتُوجَّه انتقادات لفكرة النطاق القابل للسكنى الذي تقرره درجة حرارة سطح الكوكب بأنها ضيقة الأفق جدًّا؛ فثمة ظروف يمكن أن تهيِّئ فيها درجةُ الحرارة التي تتولد في كوكبٍ ما بيئةً مناسبة للحياة على سطحه، بالرغم من أن هذا السطح قد يبدو غير صالح للسكنى. وحتى على سطح كوكبنا الأرضي لدينا علم بكائنات محبة للعيش في الظروف المتطرفة؛ إذ تعيش في درجة حرارة أقل من صفر درجة مئوية، أو أعلى من ١٠٠ درجة مئوية؛ ومن ثم فإنه حتى وإن كانت جميع مظاهر الحياة — كما هو الحال

على كوكب الأرض — تقوم على أساس سلاسل من جزيئات الكربون، وتعتمد على الماء باعتباره مادة مذيبة، فإن هناك أماكن عديدة في المجموعة الشمسية «من الممكن» أن تكون هناك حياة فيها (بالرغم من أننا لا نعرف حياةً سوى تلك الموجودة على كوكب الأرض)، وعدة ملايين — على الأقل — من المواضع القابلة للسكنى في أماكن أخرى في المجرة. سوف أعود إلى هذه النقطة قرب نهاية الكتاب.

(٧) ارتياد الفضاء

التليسكوبات مفيدة جدًّا؛ فمن خلالها يمكن مثلًا قياس درجة حرارة سطح كوكب معين وغلافه الجوي، كما يمكن التعرف على بنية كلٍّ منهما. واكتشف ويليام هيرشل — على نحو صحيح — الأغطية الجليدية القطبية الموجودة على كوكب المريخ منذ وقت طويل (عام ١٧٨١). وكوكب المشتري ضخم وقريب بما يكفي بحيث يمكن رصد العواصف الموجودة بين سحبه حتى باستخدام التليسكوبات المتواضعة الإمكانيات. ومع ذلك، كان هذا الكتاب سيصبح مملًّا وأكثر اعتمادًا على التكهنات لولا نصف قرن من ارتياد الفضاء، عندما زارت مسابيرُ فضائيةٌ أُطلقت من الأرض جميعَ كواكب المجموعة الشمسية؛ فقد وصلت مسابير سوفييتية إلى القمر في عام ١٩٥٩، وسار ١٢ رائد فضاء أمريكيًّا على سطحه فيما بين عامَي ١٩٦٩ و١٩٧٢. وقد مرَّ بكوكبَي الزهرة والمريخ مسابير أمريكية (تابعة لوكالة الفضاء الأمريكية ناسا)، وأخرى سوفييتية غير مأهولة، وذلك في فترة الستينيات من القرن العشرين، وحققت هبوطًا آمنًا على سطحيهما ومداريهما خلال فترة السبعينيات. وحدث أول مرور بجوار كوكبَي المشتري وزحل في فترة السبعينيات، وقد تمت زيارة الكواكب العملاقة الأخرى في فترة الثمانينيات. وبدايةً من عام ١٩٩٠، تم ارتياد الكواكب الأرضية بواسطة مركبات فضائية ذات إمكانيات أكبر، وسارت العربات الفضائية الروبوتية على سطح كوكب المريخ، وتمت جولات مدارية معقدة بنجاح حول كلٍّ من المشتري وزحل.

من بين أكثر البعثات الفضائية شهرة «فايكنجز» ١ و٢ اللتان هبطتا على كوكب المريخ في عام ١٩٧٦، و«ماجلان» التي رسمت خريطة لسطح كوكب الزهرة بواسطة الرادار في الفترة ما بين عامَي ١٩٩٠ و١٩٩٤، و«فويدجرز» ١ و٢ اللتان مرَّتا بالكواكب العملاقة بين عامَي ١٩٧٩ و١٩٨٩، و«جاليليو» التي دارت حول كوكب المشتري بين

عامَي ١٩٩٥ و٢٠٠٣، و«كاسيني» التي بدأت جولة مدارية حول كوكب زحل في عام ٢٠٠٤، وأرسلت مسبارًا باسم «هايجنز» لسطح القمر تيتان في عام ٢٠٠٥.

ومن بين أبرز الأحداث في السنوات التي تلت ذلك العودةُ إلى الأرض بعيِّنات تم جمعها من كوكب المريخ والكويكبات والمذنبات، وهبوط الإنسان من جديد على سطح القمر. ولم تَعُد الولايات المتحدة وروسيا القوتين الفضائيتين الوحيدتين؛ فقد توجهت وكالة الفضاء الأوروبية منفردةً إلى كوكبَي المريخ والزهرة، وإلى زحل بالاشتراك مع وكالة ناسا، وسوف تتوجه قريبًا إلى عطارد مع اليابان. وقد أرسل اليابانيون مسابير فضائية إلى القمر وإلى أحد الكويكبات، وقد وصلت الصين والهند إلى القمر. وكان هناك قدر كبير من التعاون في المجال العلمي، والدليل على ذلك أن الكثير من المسابير تحمل معدات وأجهزة أسهمت بها دول عدة، لكن لا يمكن إنكار حقيقة أن بعض الدول ترى خروجها من هذا المجال يضع فخرها القومي على المحك، إضافة إلى مصالح استراتيجية وتجارية طويلة الأمد.

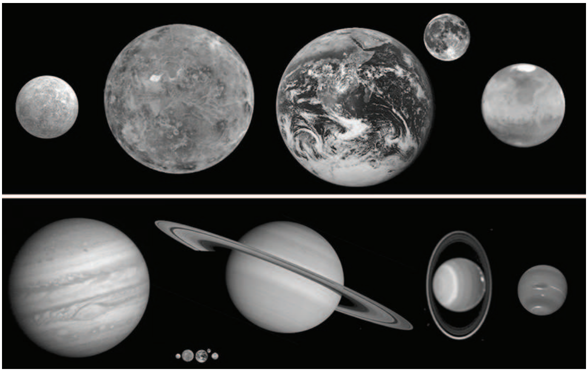
الفصل الثاني

الكواكب الصخرية

سوف أتناول في هذا الفصل الكوكب الذي نعيش على ظهره وغيره من الأجرام المشابهة له، وهي تحديدًا الكواكب الأرضية الثلاثة؛ عطارد والزهرة والمريخ، وذلك إضافة إلى القمر الأرضي. بالنسبة لعلماء الفلك التابعين للاتحاد الفلكي الدولي، القمر الأرضي ليس إلَّا قمرًا تابعًا، لكن بِنْيَته وتركيبه الداخلي يضعانه ضمن الكواكب الأرضية من وجهة نظر الجيولوجيين والجيوفيزيائيين. يبين الشكل رقم ٢-١ هذه الأجرام الخمسة بنفس مقياس الرسم، ويتضمن الجدول رقم ٢-١ بعض البيانات الخاصة بها. ومن بين هذه المجموعة، لا يمتلك عطارد والقمر غلافًا جويًّا. وكوكب الزهرة له حجم وكتلة وكثافة أقل على نحوٍ طفيف مقارنةً بكوكب الأرض؛ ومن ثم فإن الجاذبية على سطحه أقل من الجاذبية على سطح الأرض على نحو طفيف، لكن غلافه الجوي أكثر كثافة بكثير. وكوكب المريخ أكبر من كوكب عطارد، لكنه أقل كثافة منه. وهذان التأثيران يعادل كلٌّ منهما الآخر؛ بحيث إن جاذبيتَي سطحيهما تكُونان متشابهتين جدًّا، لكن نظرًا لكون المريخ أكثر برودة؛ فقد استطاع الاحتفاظ بغلاف جوي رقيق لكنه ذو حجم مناسب. وسطح القمر الأرضي أقل جاذبية مقارنة ببقية الأجرام التي نتحدث عنها هنا — ما يعادل نحو سدس جاذبية كوكب الأرض — وهذا هو سبب أننا نلاحظ أن السائرين على سطح القمر يَثِبُون على نحو غريب جدًّا. ومتوسطات درجات الحرارة على أسطح تلك الأجرام تضفي غموضًا على التباينات الكبيرة مع دائرة العرض، وبين النهار والليل في بعض الأحيان. على سبيل المثال، أعلى درجة حرارة خلال النهار على سطح كوكب عطارد تزيد عن ٤٠٠ درجة مئوية، في حين أن درجة الحرارة وقت الفجر بعد ليلة طويلة على سطح نفس الكوكب تكون أقل من ١٨٠ درجة تحت الصفر.

جدول ٢-١: بيانات أساسية عن الكواكب الأرضية.

	الكتلة (١٠^{٢٤}كجم)	القطر القطبي (كم)	الكثافة (١٠^{٣}كجم متر$^{-٣}$)	جاذبية السطح (متر ثانية$^{-٢}$)	الضغط الجوي (بار)	متوسط درجة حرارة السطح
عطارد	٠٫٣٣٠	٤٨٨٠	٥٫٤٣	٣٫٧	١٠$^{-١٥}$	١٧٠ درجة مئوية
الزهرة	٤٫٨٧	١٢١٠٤	٥٫٢٠	٨٫٩	٩٢	٤٨٠ درجة مئوية
الأرض	٥٫٩٧	١٢٧١٤	٥٫٥١	٩٫٨	١	١٥ درجة مئوية
القمر	٠٫٠٧٤	٣٤٧٦	٣٫٣٤	١٫٦	٢ × ١٠$^{-١٤}$	١ درجة مئوية
المريخ	٠٫٦٤٢	٦٧٥٠	٣٫٩٣	٣٫٧	٠٫٠٠٦٣	−٥٠ درجة مئوية



شكل ٢-١: الجزء العلوي من الصورة: من اليسار إلى اليمين عطارد، الزهرة، الأرض، القمر، المريخ مُبيَّنة بنفس مقياس الرسم. الجزء السفلي: الكواكب العملاقة الأكبر حجمًا بكثير؛ وهي: المشتري، زحل، أورانوس، نبتون، مع الكواكب الأرضية موضوعة بنفس مقياس الرسم.

(١) اللب

تتميز الكواكب الأرضية عن غيرها بامتلاكها أجزاءً خارجية صخرية تتكون في أغلبها من معادن السليكات. لكن كثافاتها كبيرة جدًّا بحيث لا تسمح لها بأن تكون صخرية بالكامل، ويُعتقد أن كلًّا منها يحتوي على لب غني بالحديد في مركزه. ولا يمكن رؤية لب أي كوكب أو أخذ عينة مباشرة منه، لكن يوجد العديد من الأدلة المستقلة. والكثافة أحد هذه الأدلة؛ إذ تشير إلى أن الجزء الداخلي لا بد أن يكون أكثر كثافة من الصخر بما يسمح حتى بانضغاط داخلي في ظروف الضغط المرتفع. وتشير تحليلات مسارات مركبات الفضاء التي تدور حول تلك الكواكب إلى أن الكثافة تزداد باتساق حول مركز كل كوكب. وتشير النماذج الكيميائية المتعلقة بما يحدث — على الأرجح — داخل الكواكب الصخرية إلى أن هناك قدرًا غير كافٍ من الأكسجين بحيث يمكن لكل الحديد الموجود أن يتأكسد ويتَّحد مكوِّنًا معادن السليكات؛ لذا، لو أن الجزء الداخلي من الكوكب قد انصهر، فإن هذا كان من شأنه أن يسمح للحديد المعدني الذي هو أكثر كثافة من الصخر، أن يغوص نحو المركز. وهذا مثال على عملية يُطلق عليها: التمايز الكوكبي.

والأجزاء الخارجية من اللب الغني بالحديد لكلٍّ من الأرض وعطارد لا بد أنها منصهرة اليوم؛ لأن كلا هذين الكوكبين لديهما مجال مغناطيسي قوي، تولَّد — على الأرجح — من حركة ديناميكية في مائع موصِّل للكهرباء. وبالنسبة لكوكب صغير مثل عطارد، فإن كثافته عالية جدًّا، ومن ثم فإنه لا بد أن يكون لبُّه ضخمًا على نحو استثنائي، يشغل نحو ٤٠٪ من حجمه، ويمثل نحو ٧٥٪ من كتلته. ولا تتولد مجالات مغناطيسية داخل كوكبَي الزهرة والمريخ والقمر الأرضي؛ ومن ثم فمن المرجح أن يكون لب كلٍّ من هذه الأجرام الثلاثة صلبًا بأكمله.

في حالة كوكب الأرض، حصلنا على المزيد من الأدلة المتعلقة باللب من دراسة الكيفية التي تنتقل بها الموجات الزلزالية — وهي اهتزازات تطلقها الزلازل (أو اختبارات نووية تتم تحت الأرض!) — في أرجاء الكوكب. وهذا يؤكد وجود لب داخلي صلب يبلغ نصف قطره ١٢١٥ كيلومترًا، ولب خارجي مائع يبلغ نصف قطره ٣٤٧٠ كيلومترًا. ويبدو أن كليهما في الأساس عبارة عن حديد ممزوج بنيكل بنسبة تتراوح بين ٥٪ و١٠٪، لكن افتراضات الكثافة تتطلب شيئًا أقل كثافة من الحديد أيضًا، يشكل من ٦٪ إلى ١٠٪ من اللب الخارجي، ومن ٢٪ إلى ٥٪ من اللب الداخلي. وأكثر التفسيرات ترجيحًا هو مزيج من نوعٍ ما من الأكسجين والسليكون والكبريت.

إجمالًا، يشغل لب كوكب الأرض نحو ١٦٪ من حجم الكوكب. وبالنسبة لكوكبَي الزهرة والمريخ، فإن اللب يشغل نحو ١٢٪ و٩٪ على الترتيب، وهذه التقديرات تعتمد في الأساس على متوسط كثافتهما. وهناك بعض البيانات الزلزالية المحدودة جدًّا التي أتت من القمر (من بعثة «أبوللو»)، والتي تلمِّح إلى وجود لب صغير نسبيًّا يتراوح نصف قطره بين نحو ٢٢٠ و٤٥٠ كيلومترًا (أقل من ٤٪ من الحجم الكلي للقمر). ويتكون نحو ١ في كل ٢٠ نيزكًا من مزيج من الحديد، ونسبة تتراوح بين ٤٫٥٪ و١٨٪ من النيكل، وهو ما يتوافق مع ألباب الكواكب المصغرة التي تنتمي لحزام الكويكبات، والتي تباينت داخليًّا قبل أن تفتتها التصادمات.

(٢) الدثار والقشرة

يُطلق على الجزء السليكي الذي يحيط بلب الكواكب الأرضية اسم الدثار، وهو يشكل أغلب الحجم الإجمالي لكل كوكب أرضي، ومعظم كتلته باستثناء كوكب عطارد. والقشرة

هي وحدة ثانوية نسبيًّا تعلو الدثار، وهي أيضًا مكوَّنة من السليكات بالرغم من أنها تختلف اختلافًا طفيفًا في تكوينها عن الدثار.

وقد تطور الدثار الحالي للكواكب من الصخر المنصهر الذي من المحتمل أن يكون قد غطى هذه الكواكب بعد آخر عملية تصادُم ضمن الاصطدام العملاق، والمعروف للجيولوجيين باسم «محيط الماجما». وبينما يبرد محيط الماجما، فإن سطحه ينشر الحرارة في الفضاء، وتتكون مِن ثَمَّ قشرة صلبة. ومع ذلك، فإن هذه القشرة تتكسر وتتقلقل باستمرار بفعل الاضطراب الحادث تحتها والتصادمات من فوقها. وتستمر درجات حرارة محيط الماجما في الانخفاض، لكن على العكس من تجمُّد كرة من الماء، ليس هناك درجة حرارة محددة يصبح عندها المحيط بأكمله صلبًا؛ فطبيعة المادة السليكية المنصهرة تتَّسم بأن ما فيها من معادن ذات تراكيب متنوعة تتبلور في درجات حرارة وضغوط مختلفة. وعلماء الكواكب لا يعلمون على سبيل اليقين إلى أي مدًى تبلورت محيطات الماجما لتشكل طبقات، أو ما إذا كانت المعادن الأكثر كثافة من المعادن المنصهرة قادرة على الهبوط لأسفل، في حين أن تلك الأقل كثافة منها كانت قادرة على أن ترتفع لأعلى، وأن تلتصق معًا لتكوين «جبال صخرية» ضخمة تستطيع أن تشق طريقها بقوة لأعلى بمزيد من الفاعلية.

وتجمعات هذه المادة العائمة التي تختلف كيميائيًّا عن محيط الماجما تحتها قد شكلت أول قشرة حقيقية على سطح القمر، وهي لا تزال باقية إلى يومنا هذا هناك، وتعرف باسم «مرتفعات القمر» (المناطق التي تظهر في لون فاتح على وجه القمر). وعلى سطح الكواكب الأرضية الأكبر حجمًا، لم تتحدد طبيعة أقدم قشرة فيها بعدُ، ويرجع ذلك في جانب منه إلى أن هذه القشرة في الأساس حلَّت محلها (أو على الأقل غطَّتها) أنواع لاحقة من القشرة. ولمعرفة الطريقة التي ربما حدَث بها ذلك، يتعين علينا أن نتحول إلى الدثار مرة أخرى. فبينما يبرد كوكب ناشئ، يصبح دثاره في نهاية المطاف صلبًا تمامًا. وهنا تبرز أهمية خاصيتين للمواد السليكية. أما الخاصية الأولى، فتتمثل في أن المواد الصلبة الساخنة بقدر كافٍ لا تكون ساكنة تمامًا ولا ثابتة في شكلها تمامًا؛ فالصخر الساخن في الجزء الداخلي من الكوكب لديه القدرة على التدفق بسرعات تبلغ بضعة سنتيمترات في كل عام (وهو المعدل الذي تنمو به أظافرك)، بطريقة تشبه كثيرًا الطريقة التي يتغير بها شكل كتلة من القار بمرور الوقت. وفي داخل الدثار الصلب، سوف تحدث الحركة بمعدل بطيء لكنه مؤثر من الناحية الجيولوجية إذا كانت هناك

قوًى قادرة على دفعه. وبداخل الكوكب، تمثل الحرارة القوة الدافعة المطلوبة. والدثار الأكثر سخونة الذي يأتي من العمق يكون أقل كثافة على نحو طفيف من الدثار الأبرد فوقه؛ ومن ثم فإن هناك احتمالًا كبيرًا لتبادُل الأماكن فيما بينهما. ويُطلق على الحركة من هذا النوع اسم الحمل الحراري، وهو ما يمكن أن نلاحظه في طبق من الحساء يتم تسخينه على شعلة موقد، غير أن «الحمل الحراري في الحالة الصلبة» داخل الكوكب يكون أبطأ كثيرًا.

تخيَّلْ أن عمودًا من الدثار الساخن يتدفق لأعلى مُزيحًا الدثار الأبرد لأسفل. وبينما يقترب من السطح، يقل الضغط الواقع تحته، وهنا تبرز أهمية الخاصية الثانية؛ فبينما يهبط الضغط، تبدأ السليكات في الانصهار. ويُطلق على هذه العملية اسم «الانصهار الجزئي»؛ لأن جزءًا فقط من المادة الصلبة ينصهر، والماجما التي تتشكل تكون أغنى بالسليكا بقدر طفيف من المادة الصلبة التي استُخرجت منها. وتكون الماجما الناتجة أقل كثافة أيضًا من المادة الصلبة؛ ومن ثم فإن قوى الطفو سوف تسحبها لأعلى نحو السطح، خصوصًا إذا كانت هناك مسارات يكون فيها الصخر الذي يعلوها تحت ضغط أو متفتتًا. وما لم تستقر الماجما في العمق كاسترساب، فإنها تثور من خلال البراكين.

والصخر الذي يتكون بهذه الطريقة يوصف بأنه صخر ناري، ويمكن أن تحل القشرة الناتجة عن نشاط الصخر الناري محل القشرة الأصلية للكوكب عن طريق التسريب أو الطمر. والبقع الداكنة على سطح القمر، المعروفة باسم «بحار القمر»، هي مناطق منخفضة طُمرت فيها القشرة الأولية الأشحب لونًا بواسطة تدفُّقات الحُمم البركانية التي أُنتجت بهذه الطريقة. ونتجت القشرة الحالية لكوكب الأرض من الانصهار الجزئي للدثار من أجل تشكيل قشرة محيطية، ومن انصهار وإعادة تدوير أجيال عدة من القشرة المحيطية من أجل تشكيل قشرة قارية. والقشرة المحيطية لكوكب الأرض تبلغ سُمكًا يتراوح بين ٦ و١١ كيلومترًا، في حين أن القشرة القارية تتباين بدءًا من نحو ٢٥ كيلومترًا في المناطق الرقيقة المنبسطة إلى ٩٠ كيلومترًا تحت سلاسل الجبال الكبرى. وإجمالًا، تشغل القشرة نحو ١٪ فقط من إجمالي حجم الأرض. ويبلغ متوسط سمك قشرة القمر الأرضي نحو ٧٠ كيلومترًا (أي ١٣٪ من حجم القمر)، ويتراوح هذا السُّمك بين أقل من ١٠٠ كيلومتر في بعض المناطق المرتفعة وأكثر من ٢٠ كيلومترًا تحت بعض الأحواض الصدمية الكبرى.

وإيجازًا، ترتبط القشرة كيميائيًّا بالدثار الواقع تحتها، لكنها تختلف بناءً على الكيفية التي استُخرجت بها منه؛ فالقشرة أقل في الكثافة، ويكون تركيبها — في المعتاد —

أغنى بالسليكا من الدثار. وتتنوع القشرة أكثر من تنوُّع الدثار، وهي تشمل الصخر الذي تفاعل كيميائيًّا مع أي غلاف جوي أو ماء سائل، والذي تَفتَّت أو ذاب أو نُقل (بفعل الجاذبية أو الريح أو الماء أو الجليد) وتَرسَّب في مكان آخر. وتُشكِّل مثل هذه الرواسب صخرًا رسوبيًّا. ويمكن أن يؤدي الطمر والتشويه والتسخين إلى إعادة بلورة الصخر الرسوبي أو الناري، وفي كلتا الحالتين يُعرف بالصخر المتحول.

(٣) الحرارة الداخلية

ترجع سخونة الكواكب من داخلها جزئيًّا إلى الحرارة المتخلفة عن تكوُّنها. وبالنسبة للكواكب الأكبر حجمًا، الجزء المتبقي إلى يومنا هذا من هذه «الحرارة البدائية» أكبر حجمًا، ويرجع ذلك إلى أن المحتوى الحراري يرتبط بحجم الكوكب الذي يعتمد على مكعب نصف القطر، في حين أنَّ تسرُّب الحرارة يعتمد في مقداره على مساحة السطح التي تعتمد فقط على مربع نصف القطر.

وتتولد الحرارة أيضًا داخل الكوكب عن طريق تحلُّل النظائر المشعة. هناك العديد من تلك النظائر، لكن أربعة منها فقط هي التي تُصدر قدرًا كبيرًا من الحرارة؛ وهي: البوتاسيوم–٤٠، واليورانيوم–٢٣٨، واليورانيوم–٢٣٥، والثوريوم–٢٣٢. وبسبب الألفة الجيوكيميائية لتلك العناصر، فإنها أكثر وفرة في صخور القشرة منها في الدثار. وفي كوكب الأرض، يتولَّد نحو نفس المقدار من الحرارة الإشعاعية المنشأ (أي الناتجة عن طريق التحلل الإشعاعي) في القشرة، كما هو الحال في كل الدثار الأكبر حجمًا بكثير.

ويتوقف المحتوى الإجمالي من العناصر المنتجة للحرارة في الكوكب الأرضي على كتلة هذا الكوكب (ومِن ثَمَّ على حجمه). ومثلما هو الحال بالنسبة للحرارة البدائية، فإن الحرارة الإشعاعية المنشأ يتم الاحتفاظ بها بطريقة أكثر فاعلية في الكواكب الأكبر حجمًا. وبالنسبة للأرض، فإن نحو نصف الحرارة التي تتسرب إلى السطح اليوم هي حرارة بدائية، وبقية الحرارة بأكملها تقريبًا حرارة إشعاعية المنشأ.

(٤) الغلاف الصخري

يحدث التحول في الخواص من البارد والجامد إلى الدافئ والحملي (أي المتعلق بالحمل الحراري) عمومًا عند عمق معين تحت الحاجز الفاصل بين القشرة والدثار؛ ومن ثم فإن

القشرة والجزء العلوي من الدثار يشكلان طبقة ميكانيكية، ما يشكل هيكلًا خارجيًّا جامدًا. وهذا الهيكل يُطلق عليه «الغلاف الصخري» أو الليثوسفير، ويوصف بأنه صخري للدلالة على أن الطبقة التي يشكلها تتمتع بالخواص الميكانيكية للصخر العادي. وأسفل الغلاف الصخري، يكون الدثار — رغم كونه صخريًّا في تركيبه — ساخنًا وضعيفًا بالقدر الذي يكفي لانتقاله بالحمل الحراري. ويُطلق على هذا النطاق أحيانًا اسم الغلاف المَوري أو الأسثينوسفير (المقطع الأول «أسثينوس» تمثيل صوتي لكلمة إغريقية تعني «بلا قوة» أي ضعيف).

ويبلغ سمك الغلاف الصخري لكوكب الأرض نحو ١٠٠ كيلومتر، وهو منقسم إلى عدد من الصفائح التي يمكن أن تُحرك بفضل هشاشة الغلاف الموري الذي تحتها. وكجزء من عملية تُعرف باسم «تشكل الصفائح التكتونية»، يتشكَّل غلاف صخري جديد حيثما تختفي الصفائح (غالبًا ما تتوارى عن الأنظار أسفل المحيط)، ويتدمر حيثما تسحب صفيحة تحت أخرى، في مناطق انغراز تتميز بوجود خنادق في قاع المحيط. وانزلاق إحدى الصفائح التكتونية بموازاة أخرى مجاورة لها هو سبب معظم الزلازل. فإذا أخبرك أحد بأن صفائح الأرض هي «قشرة تنزلق على الدثار»، فإنهم مخطئون؛ إذ يكررون مغالطة لا تزال تظهر في الكثير من الكتب والمناهج الدراسية. والحقيقة هي أن الصفيحةَ تتكون من قشرةٍ والجزءِ العلوي الصلب من الدثار، اللذين ينزلقان معًا عبر دثار الغلاف الموري الأكثر عمقًا والأقل صلابة.

ونظرًا لكون الغلاف الصخري هشًّا، فإنه عبارة عن طبقة يمكن أن تحدث فيها صدوع (فوالق)، كأن تنزلق كتلة صخرية بموازاة أخرى. والصدوع شائعة الوجود على كوكب الأرض، لا سيما في المناطق التي تلتقي فيها صفيحتان، ويمكن التعرُّف عليها على الكواكب الأخرى أيضًا (انظر الشكل رقم ٢-٢).

ويبدو أن الأرض تنفرد بالصفائح التكتونية عن غيرها من الكواكب. ويرجع هذا بلا شك إلى السمك الأكبر للغلاف الصخري في الأجرام الأصغر حجمًا، التي تبرد بسهولة أكبر؛ كعطارد والمريخ والقمر، لكن ثمة عاملًا أكثر أهمية؛ وهو أنه كي تكون الصفائح قابلة للحركة، لا بد أن يكون الجزء العلوي من الغلاف الموري ضعيفًا. وفي كوكب الأرض، هذا متحقق بسبب وجود قدر صغير من الماء داخل الصخرة يُضعفها، ويساعد على تكوين قدر صغير من المادة المنصهرة التي تتسرب بين الحدود الحبيبية لمنع الاحتكاك. وقد فقد كوكب الزهرة ماءَه؛ ومن ثم فإن غلافه الموري جاف ولا يمكن أن تنزلق صفائح غلافه الصخري بحُرية خلاله.



شكل ٢-٢: منظر يغطي ٥٠٠ كيلومتر لجزء من كوكب عطارد، وضوء الشمس يأتي له من جهة اليمين، والظل يغطي جرفًا ارتفاعُه كيلومتر واحد، ويتخذ شكل حرف M مفتوح على جانبه. وهذا صدع دسر قديم يطلق عليه «بيجل روبيس»، يميز المكان الذي زُحزحت فيه المنطقة الموجودة على يمين الصورة (الشرق) نحو الغرب فوق المنطقة الموجودة على اليسار (الغرب). وبعض الفوهات أقدم والبعض الآخر أحدثُ عمرًا من هذا الصدع.

يظهر الغلاف الموري الكوكبيُّ الذي يتَّسم بالجفاف أو العمق الشديد بفعل تأثيرين على السطح. أما التأثير الأول، فهو ارتفاع الجبال وعمق الأحواض. فإذا كانت الأحواض والجبال ضخمة للغاية، فسوف يتدفق الغلاف الموري ويثني الغلاف الصخري الموجود أعلاه، وبذلك يقلل التباين الطبوغرافي إلى أن يصبح صغيرًا بالقدر الكافي لأن تتحمله قوة الغلاف الصخري وحدها. وأما التأثير الثاني، فيتمثل في نمط التفتت الذي تتسبب فيه الاصطدامات الكبيرة. ويصل الجسم الصادم الذي يبلغ قطره عدة عشرات من الكيلومترات بقوة تكفي الموجات الصدمية الناتجة التي تشكل الفوهات كي تشق الغلاف الصخري، وتأخذ الفوهة شكل حوض يميزه حلقات من الصدوع التراكزية. وفي الأغلفة الصخرية الأقل سمكًا، غالبًا ما تكون الحلقات أقرب بعضها لبعض؛ ومن ثم يمكن استخدام الأحواض الصدمية المتعددة الحلقات من أجل تقدير العمق وصولًا إلى الغلاف

الموري وقت تكوينها. وبينما يبرد الكوكب ببطء، يصبح غلافه الصخري أكثر سمكًا على نحو تدريجي.

(٥) النشاط البركاني

الماجما أو العصارة هو الاسم الذي يُطلق على الصخر المنصهر قبل أن يثور، ويمكن أن تتولد الماجما داخل الكواكب، ويرجع ذلك في الأساس إلى ثلاثة أسباب مختلفة. وليس التأثير المباشر للحرارة سوى واحد فقط من تلك الأسباب، وهو في الغالب أقلها أهمية؛ فالتراكم البطيء للحرارة المحتجزة أسفل الغلاف الصخري للكوكب يمكن أن يفسر بعض الحوادث البركانية الواسعة الانتشار، والضغوط المدية القوية والمتنوعة داخل جرم كوكبيٍّ تعمل للحيلولة دون حدوث احتكاك داخلي؛ ما يؤدي إلى «التسخين المدي». على الجانب الآخر، يمكن أن يؤدي تناقُص الضغط في منطقة التدفق لأعلى في الدثار إلى حدوث انصهار جزئي (قد يؤدي مثلًا إلى تشكيل قشرة محيطية لكوكب الأرض). إضافة إلى ذلك، من الممكن أن يؤدي الانخفاض «المفاجئ» في الضغط — كما يحدث للدثار الذي يتشكل تحته حوض صدمي كبير — إلى حدوث عملية انصهار. والآلية الثالثة تتمثل في إدخال الماء إلى الدثار أو القشرة السفلى. ويقلل الماء من درجة الحرارة التي عندها تبدأ السليكات في الانصهار. وكوكب الأرض به سلاسل من البراكين فوق مناطق الانغراز (الهبوط)؛ لأن الماء الذي يكون قد تم سحبه لأسفل داخل صخور الصفيحة الهابطة يهرب لأعلى نحو قاعدة الصفيحة العلوية. وهنا، لا تكون الأجواء ساخنة بما يكفي للانصهار الجاف، ولكن يبدأ الانصهار الجزئي بمجرد أن يتم إدخال الماء حتى وإن لم يحدث ارتفاع في درجة الحرارة.

(٥-١) القمر الأرضي

بدأ الناس يتكهنون بشأن حدوث أنشطة بركانية على سطح القمر بمجرد أن رصدت التليسكوبات فوهات على سطحه. وقد جانبهم الصواب؛ إذ إننا متأكدون — إلى حدٍّ بعيد — الآن أن كل الفوهات الموجودة على سطح القمر، تقريبًا، سببُها حدوث اصطدامات. في الواقع، مناطق النشاط البركاني المهمة على سطح القمر هي تلك البقع الداكنة التي اعتُقد في وقت من الأوقات أنها قيعان بحار جفَّت. هذا ليس هو الحال بالرغم من أنها

لا تزال يُطلق عليها اسم «بحار». وهي تغطي نحو ١٧٪ من سطح القمر، وأغلبها في الجانب القريب؛ وهو نصف القمر المواجه باستمرار لكوكب الأرض. وهنا الحمم المشابهة في تركيبها البازلت الموجود على سطح الأرض تدفقت لتغمر الأحواض الصدمية الكبيرة المتعددة الحلقات.

بعض الفوهات التي ثارت منها حُممُ البازلت الموجودة في بحار القمر يصعب التعرُّف عليها (انظر الشكل رقم ٢-٣). من الواضح أنها لم تتخذ شكل فوهات مخروطية. والأرجح أنها صدوع دُفعت من خلالها الحمم المنصهرة والمتوهجة بفعل قوة الغاز البركاني المتسع نطاقًا؛ لتصل إلى ارتفاعات تزيد على كيلومتر واحد. وعند سقوطها على السطح، ظلت الحمم على حالها من السخونة بما يكفي لانتشارها على السطح، وتدفقت في انحدار لمئات الكيلومترات. ومعظم الفوهات الصدعية اختفت لأن معدل ثورة براكينها انخفض، أو لأنها طُمرت بفعل ثورات بركانية لاحقة.

أربع من رحلات «أبوللو» الست التي هُبط فيها على سطح القمر (التي تمت فيما بين عامي ١٩٦٩ و١٩٧٢) كانت في بحار القمر، التي هي أماكن أكثر تسطحًا وأكثر أمنًا للهبوط عليها مقارَنةً بمرتفعات القمر. ويمكن تحديد أعمار عينات من بازلت بحار القمر، التي جلبتها هذه الرحلات، من أجل تحليلها على سطح الأرض، بدقة عالية، عن طريق قياس نواتج التحلل الإشعاعي المصاحبة لها (تقنية تحديد الأعمار بالإشعاع). وتشير عينات رحلات «أبوللو» إلى نطاق لأعمار بحار القمر يتراوح بين ٣٫٩ و٣٫١ مليارات سنة. وهذه المدة الطويلة للنشاط البركاني تضع نهاية لأبسط تفسير بركاني لبحار القمر، والذي كان يشير إلى أن النشاط البركاني حدث كنتيجة مباشرة للاصطدامات التي أدَّت إلى تكوُّن أحواض. وعلاوة على ذلك، أدَّت الجهود المبذولة منذ عام ٢٠٠٠ إلى التعرُّف على بعض بقع من بحار القمر تحمل عددًا كافيًا من الفوهات الصدمية الموجودة عليها؛ مما يعني أن عمرها يجب أن يكون أقل من نحو ١٫٢ مليار سنة. من ناحية أخرى، في عام ٢٠٠٧، وُجد أن شظية نيزكية من مادة قمرية عُثر عليها على سطح الأرض (بعد أن قُذفت في السابق من سطح القمر على هيئة مقذوف من فوهة صدمية) تحتوي على شظايا من البازلت يُقدر عمرها بنحو ٤٫٣٥ مليارات سنة؛ أي قبل انتهاء القصف الكثيف المتأخر بنحو نصف مليار سنة. ولم يَعُد ممكنًا رؤية بحار بهذا العمر الهائل؛ إذ إنها طُمرت بفعل مقذوف من اصطدامات لاحقة شكلت أحواضًا؛ لذا، نحن الآن نعلم أن النشاط البركاني القمري بدأ مبكرًا وانتهى متأخرًا.



شكل ٢-٣: منظر يغطي ٢٠٠ كيلومتر للحافة الجنوبية الشرقية من بحر الأمطار القمري، والمنطقة الوعرة على اليمين هي جزء مرتفع من القشرة تبرز في جزء من حافة الحوض، والمنطقة الملساء الأكثر قتامة في الجانب الأيسر العلوي تمثِّل بازلت بحار القمر التي غمرت السطح المنخفض. وهناك وادٍ بعرض كيلومتر واحد يُطلَق عليه هادلي ريل، ويمتد من الجنوب إلى الشمال وسط المنظر، ويُعتقد أنه مسار تدفقت خلاله الحمم البركانية من مصدر يخفيه الظل إلى حد كبير. وقد هبطت الرحلة «أبوللو ١٥» بالقرب من وادي هادلي ريل، الذي يوجد في وسط الصورة تقريبًا.

(٢-٥) عطارد

المعلومات التي لدينا عن عطارد أقل كثيرًا من المعلومات التي لدينا عن القمر الأرضي؛ إذ لم يتم تصوير سوى أقل من نصفه بواسطة بعثة مركبة الفضاء «مارينر١٠»، التابعة لوكالة ناسا، فيما بين عامي ١٩٧٤ و١٩٧٥. ومنذ ذلك الحين، لم تتجه أي رحلات فضائية إلى هذا الكوكب إلى أن بدأ مسبار «مسنجر»، التابع لوكالة ناسا، مجموعة من الرحلات التي قامت بالمرور بجوار الكوكب في عام ٢٠٠٨. وقد كشف هذا تفاصيل تكفي للتغلب على تشكك معظم الناس بشأن مقدار النشاط البركاني في الكوكب. على سبيل المثال، في الشكل رقم ٢-٢، المنطقة الملساء الموجودة في الجانب الأيمن السفلي التي تملأ

حوضًا قطره ١٢٠ كيلومترًا، ويعلو مباشرة الجزء الأيمن من الوسط؛ اتُّفق على أنها بركان. ومما زاد الشكوك السابقة حقيقةُ أنَّ كوكب عطارد يعوزه التباين في الوضاءة (وهي قدرة الجِرم غير المنير على عكس الضوء) بين المرتفعات الأكثر سطوعًا والحمم البركانية الأكثر قتامة، والذي جعل بحار القمر بهذه الدرجة من الوضوح على سطح القمر. ويرجع هذا — على ما يبدو — إلى أن المعادن التي تتشكَّل منها الحمم البركانية على سطح كوكب عطارد تحتوي على مقدار من الحديد يقل كثيرًا عن مقداره في البازلت القمري (والأرضي). والأرجح أن السهول التي كوَّنتها الحمم البركانية تشكِّل أغلب سطح كوكب عطارد. وبعض هذه السهول قديمة جدًّا بحيث يعود تاريخها إلى حقبة القصف الكثيف المتأخر، وقد تشكَّلت فيها فوهات بكثافة، وبعضها الآخر أحدثُ عمرًا وبه عدد أقل من الفوهات المتكوِّنة فوقها.

وقد صوَّرت مركبة الفضاء «مسنجر» عددًا من الفوهات البركانية وبقعًا غريبة يبلغ حجمها ١٠ كيلومترات — بعضها ساطع وبعضها داكن — ربما تكون مواقع لثورات بركانية أحدث عمرًا. والأرجح أنه سيبقى الغموض يكتنف المدة التي ظل خلالها النشاط البركاني على كوكب عطارد قائمًا، إلى أن تتمكن مركبة فضائية من الدوران في مدار حول الكوكب، وتسجيل صور بانتظامٍ وبتفاصيلَ أفضل. وسوف تحين الفرصة الأولى عندما تبدأ مركبة الفضاء «مسنجر» المرحلة المدارية من بعثتها الفضائية في عام ٢٠١١، وإذا لم تَحسِم هذه المسألة، فإن بعثة «بيبي كولومبو» التابعة لوكالة الفضاء الأوروبية، التي من المفترض أن تصل إلى كوكب عطارد في عام ٢٠٢٠، سوف تحسمها. في الوقت الحالي، يمكن أن نقول إن مناطق الحمم الممتدة تشكلت خلال فترة امتدت — على الأقل — نحو ٣ إلى ٤ مليارات سنة، ومن الوارد أن تكون قد امتدت هذه الفترة لتشمل المليار سنة الماضية. وهذه الفترة الطويلة من النشاط البركاني على كوكب عطارد لم تكن متوقعة، وربما نشأت من نفس المصدر الحراري الغامض الذي يُبقي على جزء من لبِّه منصهرًا.

(٣-٥) الزهرة

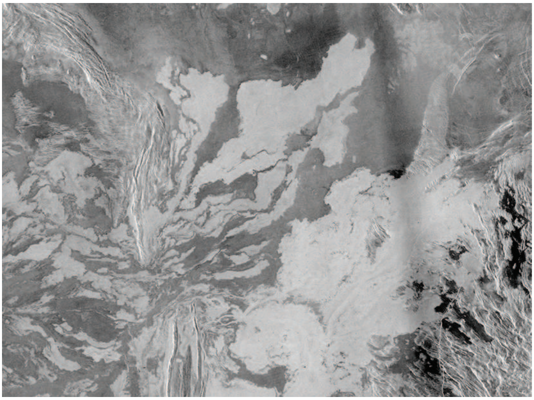
كوكب الزهرة أكبر حجمًا بكثير من كوكب عطارد، وحجمه وكتلته يشيران إلى أن الحرارة الإشعاعية المنشأ المتولدة فيه تكاد تكون مساوية لتلك المتولدة في كوكب الأرض؛ ومن ثم فإن ذلك يرجح مستوًى مماثلًا من النشاط البركاني، لكن نظرًا لأن كوكب الزهرة يفتقر إلى الصفائح التكتونية، فإن نشاطه البركاني يتم بآلية مختلفة.

الغلاف الجوي لكوكب الزهرة غلاف كثيف ملبَّد بالغيوم على نحو دائم؛ ما جعل سطحه بمنزلة لغز كبير إلى أن أصبح ممكنًا دراسته باستخدام الرادار. يبين الشكل رقم ٢-٤ صورة رادارية لجزء من كوكب الزهرة التقطها مسبار «ماجلان»، التابع لوكالة ناسا؛ حيث رسم المسبار صورة شبه كاملة للكوكب بين عامي ١٩٩٠ و١٩٩٤. الصور الملتقطة عن طريق الرادار تم تجميعها بتحليل معقد للأصداء التي ارتدَّت استجابةً لمجموعة متصلة من النبضات الرادارية الموجهة إلى سطحه. ويمكنك التعامل مع الصور الرادارية كما تتعامل مع الصور البصرية الأبيض والأسود التي تشبهها، بالرغم من أن وضوح كل سمة يخضع في الأساس لمدى وعورة سطح المنطقة، وليس لمدى وضاءتها في الضوء المرئي.

يصور الشكل رقم ٢-٤ جزءًا كبيرًا من كوكب الزهرة، وهو يبين العديد من تدفقات الحمم البركانية — بعضها أكثر وعورة (أفتح لونًا) وبعضها أكثر ملاسة (أكثر دكانة) — التي تتحرك من الغرب إلى الشرق بعرض الصورة. والشكل المفصص لكل تدفق يشبه — إلى حد كبير — الشكل المفصص لتدفقات الحمم البركانية على كلٍّ من كوكبَي الأرض والمريخ، لكن يصعب تمييزه على سطحَي القمر وعطارد؛ حيث إن حوافَّ التدفقات انخفضت بفعل الاصطدامات.

وإضافة إلى كون تدفقات الحمم البركانية تغطي نحو نصف سطح كوكب الزهرة، يمتلك الكوكب العديد من البراكين التي يمكن التعرف عليها بوضوح. يبين الشكل رقم ٢-٥ مثالًا لذلك؛ ففي الخلفية يوجد بركان يبلغ ارتفاعه ٥ كيلومترات بحوافَّ منحدرة — على نحو طفيف — من النوع المعروف على كوكب الأرض باسم «البركان الدرعي»، الذي ينشأ من ثورة متكررة للبازلت من خلال فوهة واحدة. ويمكن ملاحظة بعض تدفقات الحمم البركانية على الحوافِّ. ولا يعلم أحد على سبيل اليقين منذ متى كانت آخر مرة ثار فيها هذا البركان وبراكين أخرى مثله. كانت هناك دلائل مثيرة للاهتمام، لكن ليس هناك دليل على نشاط حالي أو حدث مؤخرًا بشأن براكين كهذه. وهذه البراكين تكون بالغة الصغر بحيث لا يمكن الاعتماد عليها في إعداد إحصاء دقيق لعدد الفوهات. وهذا البركان تحديدًا يوجد في منطقة أقدم عمرًا وأكثر ملاسة باستثناء وجود بعض الشقوق على سطحها. والفوهة الصدمية في صدر الصورة ليس لها علاقة — على الأرجح — بتدفقات الحمم الزاهية الموجودة على اليسار منها مباشرة.

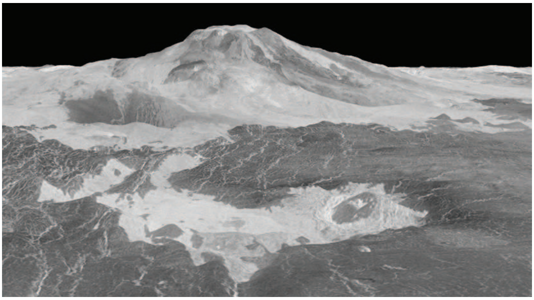
يطلق على الأنماط الدائرية أو البيضاوية للصدوع التراكزية اسم «الأكاليل»، وهناك أكثر من ٣٠٠ إكليل تم التعرف عليه على سطح كوكب الزهرة، ولا يُعتقد أن هذه



شكل ٢-٤: صورة تغطي ٥٠٠ كيلومترًا لجزء من كوكب الزهرة؛ التقطها مسبار «ماجلان». وأغلب المنطقة حمم بركانية يغذِّيها مصدر يقع على بُعد ٣٠٠ كيلومتر في غرب الصورة، ولكن يوجد في الركن الجنوبي الشرقي منطقة وعرة تمثِّل أقدم قشرة باقية على سطح كوكب الزهرة. ويمتد من الشمال إلى الجنوب في غرب الصورة حزام جبلي يتَّسم بتضاريس أخدودية وصدعية، وتقطعه تدفقات حمم بركانية.

الأكاليل يجمعها منشأ مشترك مع الأحواض الصدمية المتعددة الحلقات الموجودة على سطح كلٍّ من القمر وكوكب عطارد. ويتراوح قطر هذه الأكاليل ما بين ٢٠٠ متر وأكثر من ٢٠٠٠ كيلومتر، وهي تقترن عادةً بصورة من صور النشاط البركاني. والأرجح أن كل إكليل يميز موقعًا تصادم فيه عمود صاعد في دثار الغلاف الموري مع قاعدة الغلاف الصخري. وتبرز الأكاليل التي لا يزال هذا العمود موجودًا بها على هيئة قباب عريضة جدًّا، في حين هبطت الأكاليل الأقدم التي لم يعد يحملها عمود دثاري. وهذا الهبوط على نحو خاص يفسِّر الصدوع التراكزية.

والفوهات الصدمية أكثر شيوعًا على كوكب الزهرة منها على كوكب الأرض، لكنها أقل عددًا بكثير منها على سطحَي القمر وكوكب عطارد (لن تجد أيًّا منها في الشكل رقم ٢-٤). وهنا يظهر تأثير عاملين: لا توجد على كوكب الزهرة مطلقًا فوهات يقل قطرها عن ٣ كيلومترات؛ لأن غلافه الجوي الكثيف يشكل درعًا حول السطح يحميه من الأجرام الصادمة الصغيرة، بيد أن الفوهات الأكبر حجمًا تتشكل بفعل أجرام تحمل قدرًا



شكل ٢-٥: رسم منظوري ثلاثي الأبعاد مصمم عن طريق الكمبيوتر يبين بركان «ماعت مونس» على سطح كوكب الزهرة. وقد صُمِّم هذا الشكل عن طريق الجمع بين صورة رادارية ونموذج للطبوغرافية الذي تم الحصول عليه بواسطة مقياس الارتفاع الراداري. ومقياس الرسم الرأسي تم تكبيره عشر مرات. وقد جُمعت مجموعتا البيانات بواسطة المركبة الفضائية «ماجلان». ويبلغ قطر الفوهة الصدمية في صدر الصورة جهة اليمين ٢٣ كيلومترًا.

هائلًا من الطاقة لا يجعلها تتأثر بالغلاف الجوي. وترجع قلة عددها إلى حداثة عمر السطح الذي يقدَّر في المتوسط بين نحو ٥٠٠ و٧٠٠ مليون سنة. وليس هناك — على ما يبدو — مناطق شاسعة أكبر أو أقل عمرًا بكثير من المتوسط العام.

وكان التفسير القياسي لهذا الأمر خلال فترة التسعينيات من القرن العشرين هو: أن الكوكب بأكمله، تقريبًا، قد تشكَّل له سطح جديد بفعل نشاط بركاني جامح بدأ من ٥٠٠ إلى ٧٠٠ مليون سنة، ولم يستمر أكثر من بضع عشرات الملايين من السنين. وهذا يمكن أن يتوافق مع عدم وجود الصفائح التكتونية على كوكب الزهرة؛ ما يؤدي إلى احتجاز معظم الحرارة المنبعثة من الدثار الأعمق أسفل غطاء الغلاف الصخري، إلى أن ينصهر جانب كبير من الجزء العلوي من الغلاف الموري. وفي النهاية، يمكن أن يتداعى الغلاف الصخري البارد الكثيف وتثور الماجما الطافية من أسفل، ويمكن أن يكون قد حدث شيء مُشابهٌ ستَّ مرات منذ تكون كوكب الزهرة، وربما يحدث مرة أخرى خلال المائة مليون سنة القادمة.

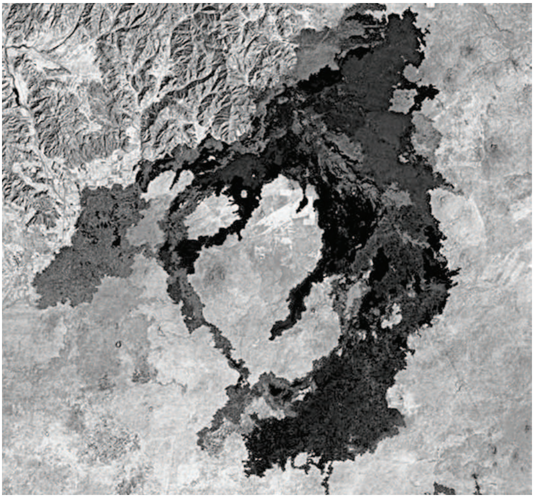
تم الاعتراض مؤخرًا على هذا النموذج الذي يتوقع حدوث نشاط بركاني كارثي على سطح هذا الكوكب. وبُني هذا الاعتراض على أساس أن إحصاء الفوهات لا يستبعد

أن تتم العملية بالتدريج. وعلى نحو تدريجي، يمكن أن يكون قد تشكَّل لدى المناطق الأصغر سطح جديد بفعل الحمم البركانية، وذلك في فترات عشوائية خلال النصف مليار سنة الماضية.

(٥-٤) الأرض

على كوكب الأرض، يعمل النشاط البركاني جنبًا إلى جنب مع الصفائح التكتونية على تنظيم توازن الحرارة الداخلية (التوازن المثالي بين الحرارة التي تمتصها الأرض من الشمس والحرارة التي تفقدها الأرض في صورة إشعاع)؛ ومن ثم يمنعان حدوث انحرافات كبيرة في درجات حرارة الغلاف الموري من نوعية ما يُفترض أن يكون قد حدث على سطح كوكب الزهرة. ولا يتسرب إلا نحو ثلث الحرارة المتولدة أسفل الغلاف الصخري بفعل التوصيل الحراري. وتنتقل معظم الحرارة إلى قمة الغلاف الصخري بفعل الاندفاع عند النتوءات الموجودة وسط المحيط (حيث تضاف مادة جديدة للصفائح المتباعدة)، وعلى نطاق أضيق بفعل الاندفاع في براكين تثور فوق مناطق الانغراز وفي «بقع ساخنة» فوق أعمدة الدثار. ويبرد الغلاف الموري بأن تُدمج فيه من جديد الأجزاء القديمة الباردة من صفائح الغلاف الصخري في مناطق الانغراز.

ويكون أقرب موضع نصل فيه إلى كارثة بركانية أشبه بما حدث في كوكب الزهرة، عندما تُطمر — كل بضع عشرات من ملايين السنين — منطقة ربما يبلغ قطرها ألف كيلومتر بفعل اندفاع ما يصل إلى عشرة كيلومترات مكعبة من حمم البازلت. وهذا يُعرف باسم «بازلت الفيضان». ومن بين أبرز الأمثلة على ذلك بازلت فيضان ديكان ترابس الواقعة شمال غرب الهند (الذي عمره ٦٦ مليون سنة)، وبازلت فيضان منطقة جرينلاند والجزر البريطانية الشمالية الغربية (الذي عمره ٥٧ مليون سنة)، وبازلت فيضان نهر كولومبيا (شمال غرب الولايات المتحدة الأمريكية، الذي عمره ١٦ مليون سنة). وهذه الأحداث المهمة والنادرة في نفس الوقت يمكن أن تكون قادرة على ضخِّ قدْر كبير جدًّا من الغاز البركاني، لا سيما ثاني أكسيد الكبريت، إضافة إلى بقايا دقيقة من الصخر البركاني تعرف باسم «الرماد البركاني» إلى الغلاف الجوي؛ ومن ثم يمكن أن يتأثر مناخ الأرض تأثرًا شديدًا. يبين الشكل رقم ٢-٦ مثالًا على تدفقات الحمم البركانية على سطح الأرض، لمقارنتها بصور ملتقطة من كواكب أخرى.



شكل ٢-٦: منظر من الفضاء يغطي ٧٠ كيلومترًا يوضِّح حَقْل الحمم البركانية المعروف باسم «كريترز أوف ذا مون» في ولاية أيداهو في الولايات المتحدة الأمريكية. كان مصدر التدفقات مجموعة من الصدوع بالقرب من حافة المرتفعات الوعرة في المنطقة الشمالية الغربية. قارنْ بين الشكل المفصص لتدفقات الحمم البركانية والتدفقات الموجودة على سطح كوكب الزهرة في الشكل رقم ٢-٤.

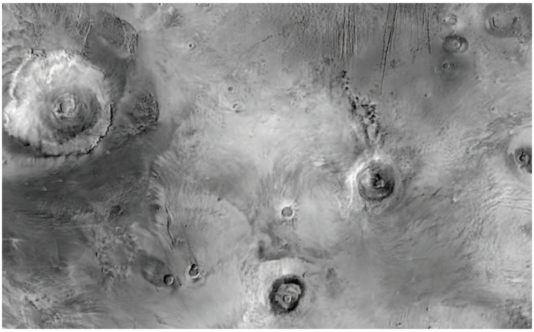
ويُرجَّح أن تتمثل الطريقة التي يختلف بها النشاط البركاني على سطح كوكب الأرض عن غيره من الكواكب، في أن اتساع نطاق الغاز في الماجما الصاعدة غالبًا ما يُمثِّل نسبةً كبيرة من الاندفاعات ذات الطبيعة الانفجارية. ويَرجِع هذا لسببين: أما السبب الأول، فهو أنَّ ما يتسرب إلى مناطق الانغراز من الماء المعاد تدويره وثاني أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكبريت يزيد كثيرًا من التسرب الذي يحدث من الجزء الداخلي الأعمق من الغازات البدائية؛ ومن ثم يكون لدى كوكب الأرض مزيد من الغاز اللازم لجعل الاندفاعات انفجارية في طبيعتها. وأما السبب الثاني، فيتمثل في أن وجود قشرة قارية يعمل على تسهيل تشكيل الماجما بمحتوى سليكا أعلى من البازلت. وهذه الماجما الغنية بالسليكا أكثر لُزُوجةً من البازلت؛ ومن ثم فإنها تتفتت بسهولة أكبر. والبراكين المخروطية شديدة الانحدار التي نراها عادةً في الكتب المصورة، مثل بركان جبل فوجي

في اليابان، نادرة الوجود على الكواكب الأخرى باستثناء كوكب الأرض؛ لأنها مظهر من مظاهر الاندفاعات الغنية نسبيًّا بالسليكا وذات الطبيعة الانفجارية جزئيًّا.

(٥-٥) المريخ

مقارنةً بكلٍّ من كوكبَي الأرض والزهرة، يوجد عدد قليل نسبيًّا من البراكين على سطح كوكب المريخ، لكن حجمها الكبير يعوِّض عددها القليل. والتجمعات الرئيسية للبراكين الدرعية البازلتية الضخمة تظهر في منطقة ثارسيس (يشتمل الشكل رقم ٢-٧ على جزء كبير منها) ومنطقة إيليزيم. ويعد بركان أوليمبس مونس أكبر براكين منطقة ثارسيس؛ إذ يقدَّر قُطر قاعدته بنحو ٦٠٠ كيلومتر، وارتفاعه من قمته إلى قاعه بـ ٢٤ كيلومترًا؛ ما يجعله أكبر بركان في المجموعة الشمسية بأكملها. وهناك سببان وراء وجود مثل هذه البراكين الكبيرة على سطح كوكب المريخ: أما السبب الأول، فهو أن كوكب المريخ يشتمل على صفيحة تكتونية واحدة؛ فغلافه الصخري عبارة عن هيكل غير منقوص (أي عبارة عن صفيحة تكتونية مفردة) يتَّسم بالسكون مقارنة بالغلاف الموري للدثار الذي يقع أسفل منه. وعلى العكس من كوكب الأرض الذي تنجرف فيه الصفائح مقارنةً بأعمدة الدثار، بحيث إن البراكين التي تغذيها أعمدة الدثار تُجرف وتُفصل عن مصدر حممها بعد بضعة ملايين السنين فقط؛ يضخ عمود الدثار على كوكب المريخ الماجما إلى نفس البقعة من الغلاف الصخري طالما ظل العمود نشطًا. وربما يكون قد بدأ بركان أوليمبس مونس في التشكُّل قبل أكثر من مليار سنة. ليس هناك وسيلة للتأكد من ذلك؛ لأننا نستطيع فقط تحديد أعمار الأشياء المكشوفة على السطح اليوم (عن طريق إحصاء عدد الفوهات)، ولا يمكننا رؤية الجزء الداخلي المطمور والأقدم عمرًا من البركان. وهناك العديد من الفوهات المتداخلة في قمته يُقدَّر عمر أرضياتها بنحو ١٠٠ إلى ٢٠٠ مليون سنة، لكن أحدث تدفقات الحمم البركانية على الحواف يقدَّر عمرها — على ما يبدو — بنحو مليوني سنة فقط، ومن المحتمل أن يثور بركان أوليمبس مونس مرة أخرى مستقبلًا. أما البراكين الأخرى في منطقة ثارسيس، فهي أقدم عمرًا بالتأكيد، والأرجح أنها أصبحت خامدة الآن.

السبب الثاني وراء وجود براكين كبيرة على سطح كوكب المريخ هو أن الظروف عليه مهيَّأة لذلك؛ فالكوكب يمتلك غلافًا صخريًّا باردًا وقويًّا يبلغ سمكه نحو ضعف سمك الغلاف الصخري لكوكب الأرض. وإذا نقلت بركان أوليمبس مونس إلى كوكب

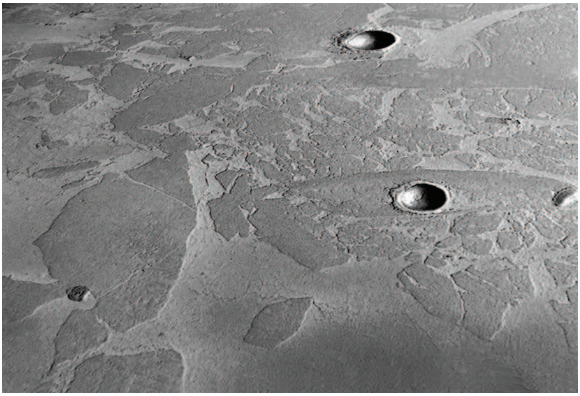


شكل ٢-٧: فسيفساء من الصور تغطي ٣ آلاف كيلومتر، وتوضح عدة براكين درعية ضخمة على كوكب المريخ. وعلى يسار الصورة، يوجد بركان أوليمبس مونس، وهو أكبر بركان في المجموعة الشمسية. وعلى الحافة اليمنى يوجد بركان ثارسيس ثولس، ومن وسط الحافة الجنوبية باتجاه الشمال الشرقي توجد ثلاثة براكين هي بافونيس مونس، وأسكريوس مونس وسيرانيوس ثولس.

الأرض أو كوكب الزهرة، فإن غلافيهما الصخريان الرقيقان نسبيًّا سوف ينخفضان تحت وطأة الحِمْل، ويقل ارتفاع البركان.

تُظهر الصورُ ذات درجة الوضوح العالية تفاصيلَ تدفقات حمم بركانية على السهول الفاصلة بين البراكين الكبيرة، وفي العديد من المناطق الأخرى من كوكب المريخ. ومع ذلك، فهناك بعض الخصائص التي يراها البعضُ بركانية، وقد أثارت جدلًا كبيرًا. ويبين الشكل رقم ٢-٨ مثالًا مهمًّا على ذلك.

وما يزيد على ٣٠ شظية من المقذوفات الصدمية التي تنطلق من كوكب المريخ جُمعت على كوكب الأرض باعتبارها نيازك، وهي إما حمم بركانية بازلتية وإما حمم بركانية بلورية خشنة تشكَّلت عن طريق الاسترساب، ويمتد نطاق تبلورها العمري من ٤,٥ مليارات سنة إلى ١٦٠ مليون سنة. ويمكننا أن نستنتج أن الصخور النارية تشكل جزءًا كبيرًا من قشرة كوكب المريخ في العمق، حتى بالرغم من أن بقعًا كبيرة من السطح بها طبقة خارجية من الرواسب المتنوعة.



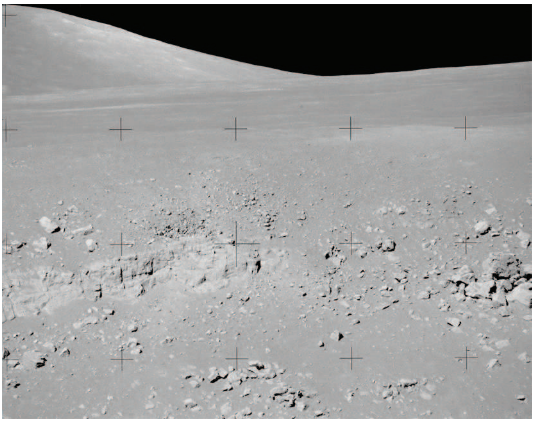
شكل ٢-٨: صورة تغطي ٥٠ كيلومترًا لمنطقة مثيرة للجدل من كوكب المريخ تم الحصول عليها بواسطة بعثة الفضاء «مارس إكسبرس»، التابعة لوكالة الفضاء الأوروبية. يقول البعض إن السطح الصفيحي عبارة عن تدفُّق حُمَم بركانية به قشرة تبريد متحطمة. ويرى آخرون هذا باعتباره سربًا جليديًّا (الآن مُغطًّى بالغبار) على سطح بحر متجمد. والفوهتان الصدميتان أقدم عمرًا من السطح الصفيحي، وحوافُّهما كانت مرتفعة بما يكفي لحماية الأجزاء الداخلية من الفيضان. والفوهات في الحقيقة دائرية، لكنها في هذا المنظر المائل مختلفة بعض الشيء.

(٦) عمليات السطح

(٦-١) الحطام الصخري والتجوية الفضائية

يحدث النشاط البركاني بفعل عوامل في باطن الكوكب، لكن سمات الكوكب يمكن أن تتحدد كذلك بفعل عمليات تحدث في الأساس على سطحه؛ فعلى سطح جرم ينعدم فيه الهواء، ومن ثَمَّ يكون غير محميٍّ من الفضاء الخارجي، تكون العملية المهيمنة التي تؤثر مباشرة على السطح هي القصف بالنيازك والنيازك الشديدة الصغر. وتغطي المادة المُتَشظِّية (المقذوفات) التي تُلقى من الفوهاتِ السطحَ حتى عمق عدة أمتار، ونادرًا ما توجد مواقع يكون فيها صخر الأديم الصلب مرئيًّا (انظر الشكل رقم ٢-٩). والتربة القمرية المعروفة باسم «الحطام الصخري» التي ترك فيها رُوَّادُ فضاء مركبة «أبوللو»

آثارَ أقدامهم تتكون من حبيبات لا يتجاوز معظمها في حجمه جزءًا من الملِّيمتر، وهي تشتمل على شظايا بلورية، وأجزاء صغيرة جدًّا من الصخر، وكريات شفافة عبارة عن قطيرات متجمدة من المادة المنصهرة الناتجة عن الحرارة المتولدة من الاصطدام. والحطام الصخري عادة ما يتم إعادة ترتيبه باستمرار بحيث يتخذ أشكالًا متنوعة، وذلك عن طريق حفر الفوهات وتشتيت المقذوفات في عملية يُطلق عليها «التنسيق الصدمي». وعلى كوكب عطارد، حيث السرعات الصدمية أكبر، يُتوقع أن يكون حجم حبيبة الحطام الصخري نحو ثلث حجم حبيبة الحطام الصخري القمري.



شكل ٢-٩: منظر مقرب لوادي هادلي ريل؛ التقطه رائد الفضاء ديف سكوت خلال رحلة «أبوللو». الطبقة الأفقية التي يبلغ سُمكُها مترين، والتي تمتد من اليسار؛ هي مثال نادر على صخر أديم (يُرجَّح أن يكون تدفقًا لحمم بركانية) مكشوف هنا على منحدر شديد الانحدار. وجميع الأماكن الأخرى مُغطاة بحطام صخري يتراوح في حجمه بين الجلمود والغبار.

في حال عدم وجود غلاف جوي، فإن الضوء الشمسي فوق البنفسجي يمكن أن يصل السطح؛ حيث يمكن أن يكسر الروابط الكيميائية بمرور الوقت. والاصطدامات التي تحدث مع النيازك الشديدة الصغر، والجسيمات المشحونة التي تأتي من الرياح الشمسية (وذلك في حال عدم وجود مجال مغناطيسي) يمكن أن تؤثِّرا أيضًا على كيمياء

السطح، بحيث تخوض الأجرام المنعدمة الهواء مجموعة من العمليات التي توصف مجتمعةً باسم «التجوية الفضائية»، والتي تغير ببطء تركيب السطح. على سبيل المثال، يمكن أن تُكسر الروابط التي تربط بين ذرات الحديد والأكسجين، وهذا يسمح للأكسجين بالهروب، ويترك حُبَيْبات دون مجهريةٍ من المعدن الخالص يُطلق عليه «الحديد في المرحلة النانويَّة».

عندما يمتلك الكوكب غلافًا جويًّا، لا يمكن أن يصل إلى سطحه بسرعة كبيرة سوى أكبر الأجرام الصادمة، وعلى نحو نادر. على سبيل المثال، في الغلاف الجوي لكوكب الأرض، يُحتمل أن تتحول الكويكبات الصخرية التي يقل حجمها عن ١٥٠ مترًا إلى شظايا، وهذه الشظايا الناتجة تكون صغيرة بما يكفي لأن يعمل الاحتكاك على الإبطاء من سرعتها؛ ومن ثَمَّ بحلول الوقت الذي تصل فيه إلى السطح تكون قد فقدت كل سرعتها الأولية تقريبًا، ولا تشكِّل فوهات. والغبار النيزكي الذي يتألف في أغلبه من النيازك الشديدة الصغر، وأيضًا من الشظايا المفصولة بالاحتكاك من النيازك الأكبر حجمًا، يستقر على السطح بمتوسط معدل تراكم يتراوح بين ٠٫١ و١ ملِّيمتر لكل مليون سنة. ويشكل هذا الغبار إسهامًا ضئيلًا في المعدل الإجمالي للترسيب؛ حيث يتم غمره كليًّا بمادة رسوبية أخرى، باستثناء أن يكون على قاع محيط عميق بعيدًا عن السطح.

(٦-٢) التعرية والنقل

بخلاف التنسيق الصدمي، تشملُ العملياتُ التي يمكن أن تبلي الصخور وتنقل الشظايا الناتجة الريحَ، والماء المتدفق، والجليد المتحرك (الأنهار الجليدية). ويمكن أن يذيب الماء الصخر أيضًا من خلال عملية التجوية الكيميائية. والعناصر التي يحملها الماء خلال عملية الإذابة يمكن أن تظهر في مكان آخر مرة أخرى حيث تترسب في معادن جديدة. وهذا ينطبق — بوجه خاص — على الرواسب الملحية، وأيضًا على العديد من أنواع الصخور الكربونية. لكنْ على كوكب الأرض يتشكل معظم الحجر الجيري (كربونات الكالسيوم) من شظايا تأتي من هياكل كائنات بحرية؛ مما يسلط الضوء على مرحلة بيولوجية مهمة في تحويل الكربونات المذابة (أو غاز ثاني أكسيد الكربون المذاب) إلى مادة صلبة يمكن أن تصير صخورًا.

ويشتهر كوكب المريخ بالعواصف الغبارية التي رصدها التليسكوب للمرة الأولى في عام ١٨٠٩. وفي الحضيض، عندما يستقبل كوكب المريخ طاقة شمسية تزيد بنسبة ٤٠٪

على الطاقة التي يستقبلها في الأوج، يمكن أن ترفع الرياح التي تزيد سرعتها على ٢٠ مترًا في الثانية كمًّا هائلًا من الغبار في السماء بحيث يُحجب السطح عدة أسابيع. وأحيانًا قلما يُرى شيء سوى قمة بركان أوليمبس مونس. وبسبب السحب التي كثيرًا ما تتجمع هناك، غالبًا ما تبدو هذه القمة بيضاء، وهذا هو السبب الذي كانت من أجله تحمل هذه القمة في السابق اسم «نيكس أوليمبيكا» (ثلوج أوليمبس)، الذي عُدِّل لاحقًا عندما أظهرت صور من مركبة الفضاء حقيقة الأمر.



شكل ٢-١٠: صورة لبعض الكثبان الرملية الضخمة. في الواقع، الْتُقطت هذه الصورة عن طريق مركبة الفضاء «أوبورتيونيتي» التابعة لوكالة ناسا، وذلك على سطح المريخ. وقد الْتُقطت الصورة بميل من حافة فوهة على حقل من الكثبان الرملية في قاعدة الفوهة. ويبلغ قطر المساحة المرئية نحو ١٠٠ متر.

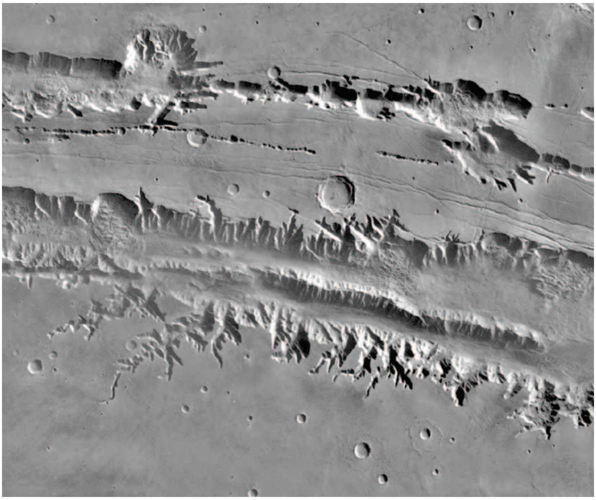
يمكن رؤية العديد من دلائل حركة الريح على سطح كوكب المريخ من المدار، أو من على السطح (انظر الشكل رقم ٢-١٠) في صورة كثبان رملية وتموجات على قشرة السطح أحدثتها هذه الريح. وبعض الكثبان الموجودة على كوكب المريخ حفرتها الريح،

لكن بعضها الآخر لم يغير — على الأرجح — من شكله على مدار ملايين السنين. والرمل الذي تعصف به الريح يعد بمنزلة عامل قوي من عوامل التعرية على سطح المريخ. وتعني الكثافة المنخفضة للغلاف الجوي أن ريحًا قادرة على نقل حبيبات رمل لا بد أنها تهب أسرع بكثير من الريح التي على سطح كوكب الأرض، وقد نُحتت بعض طبقات الصخر المكشوفة بطريقة عجيبة عن طريق التآكل.

الغلاف الجوي لكوكب الزهرة أكبر كثافة بكثير من الغلاف الجوي لكوكب الأرض؛ إذ يمتلك ضغطًا جويًّا سطحيًّا أكبر بنحو ٩٢ ضعفًا من الضغط الجوي السطحي لكوكب الأرض. حتى الرياح البطيئة يمكن أن تحرك ذرات الرمل، ويمتلك كوكب الزهرة العديد من حقول الكثبان الرملية. لكنْ عندما تضرب حُبَيْبَةٌ حرَّكتْها الريحُ صخرَ أديمٍ مكشوفًا، تكون قدرتها على التعرية محدودة، ويرجع ذلك في جانب منه إلى قيام الهواء الكثيف بتقليل سرعة الضربة وتخفيفها، ويرجع في جانب آخر إلى أن درجة حرارة السطح المرتفعة التي تبلغ ٤٨٠ درجة مئوية تجعل المادة تتشوَّه تشوهًا لدنًا بدلًا من أن تبلى عن طريق التفتت.

بالنسبة لساكني كوكب الأرض، عادةً ما يكون الماء المتدفق هو أكثر عامل مألوف لنقل الرواسب، سواء كان في نهر أو في صورة أمواج على شاطئٍ ما. ولا يوجد في المجموعة الشمسية سوى كوكب الأرض حاليًّا الذي يتمتع بظروف سطحية تجعل الماء يحتفظ بصورته السائلة؛ فكوكب الزهرة شديد الحرارة، وبالرغم من أن درجة حرارة الظهيرة على كوكب المريخ يمكن أن تزيد قليلًا على درجة الصفر المئوية، فإن غلافه الجوي يكون رقيقًا جدًّا لدرجة أن الجليد الموجود على سطحه يتحول مباشرة إلى بخار بدلًا من أن ينصهر. ومع ذلك، فهناك كم كبير من الأدلة على أن الماء كان يتدفق في وقت من الأوقات بكميات هائلة على سطح المريخ (انظر شكل ٢-١١). وقد عانى كوكب المريخ عددًا من حالات التطرف المناخي مساويًا — على الأقل — لعدد حالات حدوث تطرف مناخي على كوكب الأرض، وكان غلافه الجوي منذ مليارات السنين كثيفًا ورطبًا بما يكفي لهطول الأمطار وحدوث فيضانات كارثية. وأكبر نظام أودية ضيقة أو أخاديد في المجموعة الشمسية، ويُطلق عليه «أودية مارينر» — نظرًا لأن هذا النظام اكتُشف بواسطة صور التقطها المسبار «مارينر ٩» عام ١٩٧١ — هو نظام صدعي يبلغ طوله ٤ آلاف كيلومتر بدأ بانشقاق القشرة، لكنه اتسع عن طريق التعرية عندما تدفق الماء خلالها. وفي أعمق نقطة منه، تكون القاعدة أسفل الحافة بنحو ٧ كيلومترات (الأخدود الكبير على كوكب

الأرض في أريزونا يبلغ عمقه كيلومترين فقط)، وهو واسع جدًّا لدرجة أنك إذا وقفت على إحدى حوافه، فلن تتمكن من رؤية الجانب المقابل وراء الأفق.



شكل ٢-١١: مجموعة من الشقوق المتجهة من الشرق إلى الغرب تدل على المنشأ التكتوني لمجموعة أودية مارينر الخاصة بكوكب المريخ، والتي لم يغطِّ المنظر — الذي بعرض ٨٠٠ كيلومتر — سوى جزءٍ بسيط منها. لاحِظ القنوات المتعرجة المشقوقة بعمقٍ التي تغذي هذه الأودية من جهة الجنوب، وهو ما يُبيِّن الدور الذي لعبته المياه المتدفقة في توسيع الوادي الرئيسي.

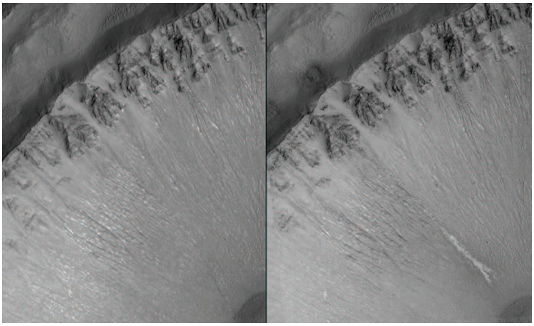
وبالرغم من اتساع نطاق مجموعة أودية مارينر، لم يتعرف عليها الراصدون باستخدام تليسكوباتهم قبل عصر الفضاء. وقنوات المريخ — التي رسم خريطةً بها الإيطاليُّ جيوفاني سكياباريلي عام ١٨٧٧، ودعمه فيها لاحقًا الأمريكيُّ بيرسيفال لويل، الذي ظلَّ يعتقد حتى مماته عام ١٩١٦ أنها أعمال هندسية عملاقة قام بها ساكنو المريخ الأذكياء — قنوات وهمية، وهي لا تمُتُّ بِصِلة لأيٍّ من القنوات الحقيقية العديدة الموجودة على كوكب المريخ. وبعض هذه القنوات التي تغذيها شبكة متفرعة من الروافد (بما يشمل عدة قنوات أطول بكثير من تلك المبينة في الشكل رقم ٢-١١) من المحتمل

أن تكون قد نتجت عن هطول الأمطار. والماء الذي تدفق في القنوات الأخرى من المحتمل أن يكون قد تسرب من الأرض، وربما يكون قد حدث ذلك عندما انصهرت الأرض دائمة التجمد. والأشكال الانسيابية «للجزر» التي تدفقت فيها القنوات عبر السهول تُبيِّن أن مصدرها كان فيضانات كارثية. المركبات الفضائية («فايكنج ١» عام ١٩٧٦ و«مارس باثفايندر» عام ١٩٩٧) التي هبطت على هذه الأماكن وجدت كمًّا وافرًا من الصخور التي غمرتها مياه الفيضانات.

يوجد على سطح جميع الأودية الكبرى على كوكب المريخ العديد من الفوهات الصدمية؛ لذا من الواضح أن هذه الأودية لا بد أن تكون قديمة؛ حيث كانت آخر مرة تدفقت فيها منذ نحو أكثر من مليار سنة. ومنذ ذلك الحين، عانى الكثير من تلك الأودية انهياراتٍ من جوانبها، ويوجد بقواعدها حاليًّا سلاسل من الكثبان الرملية تشكَّلت بفعل الرياح الباردة التي تهبُّ على امتدادها. وفي فترتي السبعينيات والثمانينيات من القرن العشرين، كان معظم العلماء يعتقدون أنه بالرغم من أن كوكب المريخ مرَّ بحِقْبة رطبة واحدة على الأقل خلال ماضيه البعيد، فإنه الآن شديد الجفاف باستثناء قطبيه؛ حيث توجد بهما أغطية صغيرة من الجليد المائي. تخيل مدى الدهشة التي أصابت الجميع عندما بدأت آلة تصوير عالية الوضوح، أُطلق عليها «كاميرا مسبار مارس»، في إظهار أودية لا يتجاوز عرضها بضعة أمتار، ولا يتجاوز طولها بضع مئات الأمتار، وذلك على منحدرات شديدة الانحدار في العديد من الأماكن على سطح كوكب المريخ. ويشير عدمُ وجودِ فوهاتٍ متراكبةٍ وملاحَظةٍ إلى أنه في كثير من الأحيان بدأت مراوح الحطام حول تلك الفوهات في طمر الكثبان الرملية، إلَّا أن تلك الفوهات لا بد أن تكون حديثة النشأة، لكنْ كم يبلغ عمرها؟ لم يتأخر الدليل كثيرًا على أن بعضها لا يزال نشطًا اليوم، عندما بدأت صور متكررة في إظهار تغييرات (انظر شكل ٢-١٢).

تحول الجدل من مسألة عمر أحدث الأودية، وتركَّز حاليًّا على الكيفية التي شُقت بها. إحدى هذه النظريات تقول إن الماء هو المسئول عن ذلك؛ فمن الوارد أن تكون هناك مستودعات من المياه الجوفية السائلة تحت ضغط في التربة التحتية لكوكب المريخ. وحيثما ينشق منحدر — مثل جدار الفوهة في الشكل رقم ٢-١٢ — أسفل سطح الماء الجوفي، يمكن أن يمنع حاجز من الجليد داخل التربة هروب هذا الماء. ومع ذلك، إذا انفتح الحاجز مؤقتًا، فمن الممكن أن ينبثق الماء منه. والسائل قد لا يكون في حالة ثابتة — فربما يغلي ويتجمد أثناء تدفقه — لكنه يستطيع أن يشق طريقه بطول أحد هذه

الأودية قبل أن يتبخر تمامًا. ويعتقد المتشككون أن التدفق السائل ليس بالضرورة هو المسئول عن حفر الأودية، ويمكن أن يُعزى وجود تلك الأودية إلى انهيارات صخرية جافة.



شكل ٢-١٢: منظران لمساحة واحدة يبلغ عرضها ١٫٥ كيلومتر، وتغطي الجدار الداخلي لفوهة قطرها ٦ كيلومترات على كوكب المريخ. وقد سُجِّلا في: أغسطس عام ١٩٩٩ (المنظر الأيسر)، وسبتمبر ٢٠٠٥ (المنظر الأيمن). وتظهر الحافة في الجزء العلوي الأيسر، والقاعدة في الجزء السفلي الأيمن. يوجد العديد من الأودية المحفورة في منحدر الجدار الداخلي، ويبدو أن أحدها قد تدفق بين هذين التاريخين حاملًا بعض الحطام الفاتح على المنحدر السفلي.

يرى بعض العلماء العاكفين على دراسة كوكب المريخ أدلة على وجود أنهار جليدية، لا سيما عند الحواف المتآكلة من الهضاب المرتفعة. ليس هناك جليد مكشوف على السطح اليوم (باستثناء الجليد الموجود عند القطبين)، لكن السطح المغطى بكتل صخرية مبعثرة، الذي ظهر في صور عالية الوضوح الْتُقطت من المدار، يمكن أن يكون حطامًا يغطي (ويعزل) الجليد الذي يوجد أسفل منه. وقد دعَّمت هذا التصور بيانات الرادار المخترق للسطح التي تم الحصول عليها من مدار كوكب المريخ. وهذا هو أحد أسباب تفضيلي قبول المنطقة المبينة في الشكل رقم ٢-٨ على أنها بحر متجمد مغطًّى بالغبار بدلًا من اعتبارها تدفقًا لحمم بركانية.

القنوات الموجودة على سطح القمر مثل وادي هادلي ريل (انظر الشكل رقم ٢-٣) كانت مسارات لحمم بركانية، ومن المؤكد أنها لم تُشقَّ بالماء، ولا يوجد ماء على سطح

القمر سوى ذلك الذي في صورة كميات صغيرة من الجليد في الحطام الصخري الموجود بالقرب من القطبين. وقد تم تحديد مكان أكثر من ٢٠٠ قناة متعرجة على سطح كوكب الزهرة، ويبلغ طول إحداها ٦٨٠٠ كيلومتر. ومن المستبعد أن يكون كوكب الزهرة قد مرَّ بتغير مناخي متطرف بما يكفي لتواجد ماء سائل حديث العهد، بما يسمح بتآكل هذه القنوات؛ ومن ثم فإنها قد شُقت هي الأخرى — على الأرجح — بواسطة الحمم البركانية.

(٧) تسمية سمات سطح الكواكب

لقد استخدمت بالفعل أسماء لسماتٍ في سطح الكواكب الأخرى عدة مراتٍ حتى الآن: بركان أوليمبس مونس، وأودية مارينر، ووادي هادلي ريل، وغير ذلك. ومن دون هذه الأسماء، كنت سأضطر إلى الإشارة إليها على النحو التالي: «أكبر بركان على كوكب المريخ.» و«نظام الأودية العملاق على كوكب المريخ.» و«الوادي الكبير الذي هبطت بالقرب منه مركبة الفضاء «أبوللو ١٥»..» بل سيكون حتى من الأصعب وصف السمات الأقل بروزًا ما لم يتم ذلك عن طريق استخدام نظام إحداثي يصعُب تذكره.

لكن لا أحد يعيش هناك، فمن إذن يحدد الأسماء؟ وإلى أي مدًى تكون هذه الأسماء رسميةً ومتفقًا عليها؟ عندما بدأ علماء الفلك للمرة الأولى في رسم خرائط عن طريق تليسكوباتهم، بعضهم كان يميل لابتكار أسماء بأنفسهم، بغض النظر عن أي أبحاث سابقة. وكانت إحدى المهام الأولى للاتحاد الفلكي الدولي (الذي تأسس عام ١٩١٩) هو وضع حدٍّ لفوضى الأسماء، والوصول إلى أسماء رسمية موحدة للسمات التي تحمل أكثر من اسم، ووضع معايير وأسس لتحديد الأسماء المستقبلية. انطبق هذا على أسماء الأجرام المكتشفة حديثًا، وأيضًا أسماء السمات الموجودة على أسطح الأجرام الكوكبية التي يمكن أن يصبح من المرغوب فيه تسميتها، أو تصبح مرئية بفضل التطور الحادث في تقنيات التصوير. في الأساس، عُنِي التطوُّر في تقنيات التصوير التي يتم بها استكشاف سمات أسطح الأجرام الكوكبية باستخدام تليسكوبات أكبر حجمًا وأفضل من حيث الإمكانيات، ويمكن أن يكون قد أدرك بعض مؤسسي الاتحاد الفلكي الدولي أنهم وضعوا وسيلة للإشراف على طريقة تسمية السمات التي تكشف عنها رحلات مركبات الفضاء.

انتقد البعض طريقة تعامل الاتحاد الفلكي الدولي لعملية إعادة تصنيف كوكب بلوتو، لكنني لا أعرف أحدًا يستاء من الطريقة التي تتم على أساسها عملية التسمية من

جانب هذا الاتحاد؛ فهي عملية منصفة وغير مُسَيَّسة تسعى لتمثيل كافة ثقافات العالم؛ ليس بالضرورة على كوكب واحد، ولكنها تكون متوازنة عبر كواكب المجموعة الشمسية بأكملها.

وبناءً على ما أصبح بالفعل إجراءً شائعًا فيما يتعلق بالسمات القمرية، يخصص الاتحاد الفلكي الدولي لكل فوهة من الفوهات اسمًا دون إضافة أي وصف له، في حين يُعطي معظم السمات الأخرى اسمًا، إضافةً إلى مصطلح لاتيني توضيحي يدل على نوعية هذه السمة؛ ومن ثم تستطيع أن تفهم على الفور من مصطلح أوليمبس مونس (مونس باللاتينية تعني جبلًا) أن السمة المذكورة هنا جبل يُطلق عليه أوليمبس. لاحظ أنه بالرغم من أنه لا أحد يشك في أن أوليمبس مونس هو بركان، فإن الكلمة التوضيحية المضافة (مونس أي جبل) لا تُبيِّن ذلك؛ فالمصطلحات التوضيحية تتجنب عن قصد «التفسير» (الذي ربما يتبين خطؤه فيما بعدُ) وتلتزم «بالوصف».

المصطلحات الوصفية الشائعة التي يمكن أن تقابلها هي: تشاسما (منخفض عميق مستطال ومنحدر الجوانب)، فلاكتس (منطقة مغطاة بتدفق بركاني)، فوسا (منخفض طويل ضيق قليل العمق)، منسا (بروز مسطح من أعلاه له حواف أشبه بحواف المنحدر)، بلانيشيا (سهل منخفض)، بلانوم (سهل مرتفع أو هضبة)، روبيس (منحدر)، وفاليس (وادٍ متفرع). على القمر الأرضي هناك أيضًا مير (والجمع ماريا) وترجمتها «بحر» ولكن هذا المصطلح أضحى شديد الرسوخ بحيث لا يمكن استبداله بآخر أكثر ملاءمة للوصف.

توجد أيضًا سمات للأسماء في كل كوكب؛ فتُسمَّى الفوهات القمرية على أسماء علماء وباحثين وفنانين مشهورين راحلين، في حين اتخذت بِحار القمر أسماءً لاتينية تصف ظروفًا مناخية متنوعة. وبخلاف القمر، المريخُ هو المكان الوحيد الذي لديه ميراث لا بأس به من الأسماء قبل أن يصبح الاتحاد الفلكي الدولي معنيًّا بالأمر. وهذه الأسماء، المضاف إليها المصطلحات الوصفية الحديثة، مصدرها الخرائط التليسكوبية التي وضعها كلٌّ من جيوفاني سكياباريلي ويجنيوس أنطونيادي في أواخر القرن التاسع عشر، وتشير في الأغلب إلى مناطق واسعة مثل ثارسيس وإيليزيم. وكل وادٍ كبير يحمل اسم كوكب المريخ بلغة مختلفة، في حين تُسمى الأودية الصغيرة على أسماء أنهار كوكب الأرض. وعلى كوكب الزهرة، تكاد تكون جميع الأسماء مؤنثة؛ فالفوهات تُسمى على أسماء نساء شهيرات في التاريخ، ومعظم السمات الأخرى تسمى على أسماء إلَهاتٍ. وعلى كوكب عطارد، تحمل

الفوهات أسماء رسامين وموسيقيين وفنانين ومؤلفين راحلين، في حين تُسمى المنحدرات على أسماء البعثات العلمية أو السفن التي حملت المشاركين فيها؛ فجرف بيجل روبيس (انظر الشكل رقم ٢-٢) سُمي على اسم سفينة بيجل التي كان على متنها تشارلز داروين، وهو يجمع الملاحظات التي ألهمته نظريته الخاصة بالتطور.

تنطبق أسس مشابهة على أسماء الكويكبات والأقمار التابعة للكواكب الأخرى. فعلى سبيل المثال، القمر التابع لكوكب المشتري، والمعروف باسم أوروبا، به فوهات تحمل أسماء أبطال وآلهة سلتية، ومعظم السمات الأخرى تحمل أسماءً مأخوذة من الأسطورة الكلاسيكية التي دارت أحداثها حول شخصية أوروبا ابنة أجينور؛ مَلك فينيقيا.

(٨) الأغلفة الجوية

بعد نشأة كل كوكب أرضي، لا بد أن يكون قد تشكَّل لديه غلاف جوي عندما تسربت الغازات الداخلية من محيط الماجما. وهذه الأغلفة الجوية البدائية ليست موجودة اليوم، بالرغم من أن الغازات التي تنبعث من البراكين تبين الخصائص التي ربما كانت تتَّسم بها تلك الأغلفة. وجاذبية كلٍّ من القمر وعطارد ضئيلة بدرجة لا تمكنهما من الاحتفاظ بغلاف غازي حولهما، و«الغلاف الجوي» الذي قد يشار أحيانًا لوجوده في كلٍّ منهما، والذي يكون ضغطه أقل بكثير من ١ على مليار من ضغط الغلاف الجوي لكوكب الأرض؛ يتكون في الأساس من ذرات شاردة طُردت من السطح بفعل اصطدام النيازك الشديدة الصغر والأشعة الكونية. وهذه الذرات شحيحة جدًّا لدرجة أن كل واحدة منها تشرد — على الأرجح — في الفضاء بدلًا من أن تصطدم بذرة أخرى. وهذه الحالة توضح ما يُعرف باسم الإكسوسفير (الغلاف الخارجي) للكوكب. وهذا الغلاف يمثل النطاق الخارجي الرقيق من معظم الأغلفة الجوية، لكن القمر وعطارد لا يستطيعان الاحتفاظ بسواه.

والجاذبية الأشد قوةً للكواكب الأرضية الأكبر حجمًا تمكِّنها من الاحتفاظ بالغاز بمزيد من الفاعلية، بالرغم من أن الكثافة والتركيب الكيميائي خضعا لتغيرات هائلة نتيجة لعمليات عديدة؛ ففي مرحلة مبكرة من نشأة هذه الكواكب، ربما تكون الرياح الشمسية الأكثر نشاطًا قد نزعت معظم الغلاف الجوي الأصلي لكلٍّ منها، لكن عُوض هذا الغلاف الجوي بالنشاط البركاني. وهناك عملية مهمة متواصلة تتمثل في أن الضوء فوق البنفسجي ذا الطول الموجي القصير يُمكن أن يشطر جزيئات بخار الماء إلى هيدروجين

وأكسجين. والهيدروجين خفيف جدًّا ويمكن أن يهرب إلى الفضاء؛ مما يجعل عملية «التفكك الضوئي» هذه للماء عملية لا رجعة فيها. وقد فقد كلٌّ من كوكبَي الزهرة والمريخ الكثير من مائهما الأصلي بهذه الطريقة. الجدول رقم ٢-٢ يوضح ملخصًا للأغلفة الجوية الحالية لكلٍّ من الزهرة والأرض والمريخ.

جدول ٢-٢: الأغلفة الجوية الحالية للكواكب الأرضية، ويتم التعبير عن كمية الغازات الستة الأكثر شيوعًا على هيئة نسبة مئوية من العدد الكلي للجزيئات (الماء متقلب جدًّا في الغلاف الجوي لكوكب الأرض)، كما يبين الجدول ضغط السطح لكلٍّ منها مقارنةً بالأرض.

كوكب الزهرة		كوكب الأرض		كوكب المريخ	
ثاني أكسيد الكربون	٩٦٫٥	النيتروجين	٧٨٫١	ثاني أكسيد الكربون	٩٥٫٣
النيتروجين	٣٫٥	الأكسجين	٢٠٫٩	النيتروجين	٢٫٧
ثاني أكسيد الكبريت	٠٫٠١٥	الماء	حتى ٤	الأرجون	١٫٦
الماء	٠٫٠١	الأرجون	٠٫٩٣	الأكسجين	٠٫١٣
الأرجون	٠٫٠٠٧	ثاني أكسيد الكربون	٠٫٠٣٤	أول أكسيد الكربون	٠٫٠٧
الهيدروجين	أقل من ٠٫٠٠٢٥	النيون	٠٫٠٠١٨	الماء	٠٫٠٣
ضغط السطح	٩٢	ضغط السطح	١	ضغط السطح	٠٫٠٠٦٣

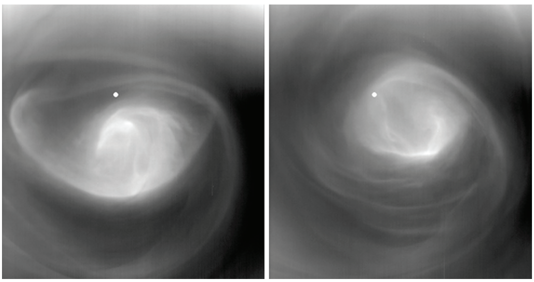
وبانشطار جزيئات الغلاف الجوي بفعل الضوء فوق البنفسجي، يمكن أن تتحد هذه الجزيئات مع جزيئات أخرى عن طريق سلسلة من التفاعلات تندرج تحت «الكيمياء الضوئية». وهذا يحدث على وجه الخصوص في «الثرموسفير» (الغلاف الحراري) الذي يبدأ أعلى السطح بنحو ١٠٠ كيلومتر، والذي سُمي بهذا الاسم لأن هذه الطبقة يتم تسخينها بواسطة طاقة الضوء فوق البنفسجي الشمسي المستخدمة إما في شطر الجزيئات، وإما في نزع بعض من إلكتروناتها. وعملية نزع الإلكترونات هذه يُطلق عليها «التأيُّن»، والأيونات (التي هي أساسًا أيونات الأكسجين في حالة كوكب الأرض، وأيونات ثاني أكسيد الكربون في حالتَي كوكبَي الزهرة والمريخ) يمكن أن تكون أكثر

وفرة في الأجزاء الخارجية من الغلاف الحراري، وتكون كافية لتكوين طبقة موصلة للكهرباء يُطلق عليها «الأيونوسفير» (الغلاف المتأين). وعندما تجلب عاصفة شمسية البلازما (الهيولي) من الشمس إلى كوكب الأرض، يؤدي هذا إلى تشويه المجال المغناطيسي، وإلى تدفق تيارات غير معتادة في طبقة الأيونوسفير؛ مما قد يؤثر سلبًا على الاتصالات اللاسلكية، بل حتى يؤدي إلى انقطاع التيار الكهربائي.

والطبقات الأعمق من الغلاف الجوي التي لا يخترقها الضوء فوق البنفسجي ذو الطول الموجي القصير؛ تكون منيعة على تفاعلات الكيمياء الضوئية. ويحدث هنا تسخين للهواء عن طريق الاحتكاك بالسطح في أغلب الأحيان (يحدث للسطح تسخين مباشر عن طريق الشمس)؛ ومن ثم فإنه في الطبقة الدنيا التي يُطلق عليها التروبوسفير تتناقص درجة حرارة الغلاف الجوي مع الارتفاع. كذلك يتناقص الضغط الجوي والكثافة مع الارتفاع؛ وهو ما يعني أن طبقة التروبوسفير تشتمل على معظم كتلة الغلاف الجوي. وفي طبقة التروبوسفير، يمكن أن يتغير التركيب بسبب التفاعلات الكيميائية بين الهواء والصخر (وهذا يعد نتيجة مباشرة للتجوية الكيميائية)، خصوصًا (وربما فقط) في حالة كوكب الأرض بسبب وجود حياة عليه. فهنا تستخدم النباتات والكائنات البدائية الأحادية الخلية الطاقة الشمسية وثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي من أجل بناء أجسامها، وتُطلِق غاز الأكسجين الذي كان نادرًا جدًّا في الغلاف الجوي الأصلي. ومن دون النباتات، لا يمكن أن تتواجد الحيوانات التي تتنفس الأكسجين (مثلنا نحن البشر). ودرجة الحرارة يمكن أن تكون مختلفة أيضًا كما سأُبيِّن بعد قليل.

عندما يسخن الهواء الموجود بالقرب من قاعدة طبقة التروبوسفير، فلا بد أنه يتمدد؛ مما يجعله طافيًا. بعد ذلك سوف يرتفع ليحل محله الهواء الأبرد المُزاح من أعلى. هذا مثال آخر على الحمل الحراري (الذي أشرنا إليه عندما تحدثنا عن دثار الكواكب)، وهو ما يحدد حالة الجو على سطح الأرض والزهرة والمريخ. ونمط دوران الغلاف الجوي مختلف في كل حالة؛ لأنه يعتمد على عوامل كثيرة؛ منها: معدل دوران الكوكب حول نفسه (وهو بطيء في حالة كوكب الزهرة)، ومعدل دوران الغلاف الجوي (أسرع كثيرًا من معدل دوران الكوكب حول نفسه في حالة طبقة التروبوسفير العليا في كوكب الزهرة)، والفارق بين درجتَي حرارة الليل والنهار (كبير في حالة المريخ وقليل في حالة الزهرة). ويبين الشكل رقم ٢-١٣ الدوران الذي يحدث فوق القطب الجنوبي لكوكب الزهرة. وعلى النقيض، غالبًا ما تبدأ أنظمة العواصف الدوامية في الغلاف الجوي لكوكب الأرض بالقرب من المنطقة الاستوائية.

ويختلف الغلاف الجوي لكوكب الأرض عن ذلك الخاص بالكوكبين المجاورين له فيما يتعلق بتعقيد طبقاته؛ ففي كوكبَي الزهرة والمريخ تتناقص درجة الحرارة سريعًا مع الارتفاع في طبقة التروبوسفير، ثم تتناقص بمزيد من البطء مع الارتفاع في طبقة (غير ناقلة للحرارة عبر الحمل الحراري) يُطلق عليها الميزوسفير، ثم تزداد مع الارتفاع في طبقة الثرموسفير بسبب امتصاص الضوء فوق البنفسجي. وكوكب الأرض ينفرد بين الكواكب الأرضية بامتلاكه طبقة تمتد من ارتفاع نحو ١٠ إلى ٥٠ كيلومترًا، بين طبقتَي التروبوسفير والميزوسفير؛ حيث تزداد درجة الحرارة مع الارتفاع. وهذه هي طبقة الستراتوسفير التي تسخن عن طريق امتصاص فوتونات ضوء فوق بنفسجي ذي طول موجي يتراوح بين ٢٣٠ و٣٥٠ نانومترًا (التي تنفذ من خلال طبقتي الثرموسفير والميزوسفير) بواسطة جزيئات الأوزون. والأوزون عبارة عن ثلاث ذرات أكسجين متحدة في جزيء واحد O_3 في مقابل الذرتين المكونتين لغاز الأكسجين O_2، وهو الذي يكون مقصودًا عادة عند الإشارة إلى «الأكسجين»، ويتم جمعه من الأكسجين بواسطة تفاعلات كيميائية ضوئية تتم في مستوًى أعلى من الغلاف الجوي.



شكل ٢-١٣: «عين» دوامة القطب الجنوبي لكوكب الزهرة التي يبلغ قطرُها ألفي كيلومتر. وقد تم التقاط الصورتين بفارق زمني ٢٤ ساعة. وتشير النقطة إلى القطب الجنوبي. هاتان الصورتان الملتقطتان بالأشعة تحت الحمراء ذات الطول الموجي المتوسط، تُظهران قمم السحب أعلى السطح بنحو ٦٠ كيلومترًا. ومركز العين أكثر سخونة (ويبدو بلون أفتح)، ما يدل على أن السحب هنا مسحوبة لأسفل نحو مستويات أكثر سخونة وعمقًا.

(٨-١) تأثيرات الدفيئة وثقب طبقة الأوزون

كثير من الناس لديهم علم «بثقب طبقة الأوزون» و«تأثير الدفيئة»، لكنهم عادة ما يجمعون بينهما باعتبارهما العاملين المسئولين عن تغير المناخ، لكن هناك اختلافًا كبيرًا بينهما.

لا توجد طبقة الأوزون إلَّا في طبقة الستراتوسفير من كوكب الأرض، وهي المكان الذي يُمتص فيه ٢٣٠ إلى ٣٥٠ نانومترًا من الضوء فوق البنفسجي. ولهذا الأمر أهميته البالغة بالنسبة لنا ولغيرنا من الكائنات الحية التي تعيش على سطح الأرض؛ لأنه إن لم يتم حجب هذا الضوء، فمن الممكن أن يتسبب في سرطانات جلدية وأضرار جينية بالغة. والمثير للدهشة أن الأمر يحتاج لقدر قليل من الأوزون حتى ينجح. فإذا جمعت كل الأوزون المنتشر في طبقة الستراتوسفير في طبقة واحدة عند مستوى سطح البحر، فلن يتجاوز سمكها نحو ٣ ملِّيمترات. هذه طبقة هشة؛ لذا عندما أصبح من الواضح — في السبعينيات والثمانينيات من القرن العشرين — أنه فوق القارة القطبية الجنوبية ربما تكون طبقة الستراتوسفير فقد فقدت نصف الأوزون الذي فيها؛ سادت حالة من القلق، وكثُر الحديث عن وجود «ثقب في طبقة الأوزون». وقد عُزِي ذلك — في الأساس — إلى تفاعلات تتضمن مركبات كيميائية صناعية يُطلق عليها «الكلوروفلوروكربونات» التي تم، نتيجة لذلك، حظْرُ استخدامها في بخاخات الأيروسول ومواد التبريد؛ كي لا تتسرب إلى الغلاف الجوي. و«ثقب الأوزون» فوق المنطقة القطبية الجنوبية وثقب أخف فوق القارة القطبية الشمالية أصبحا مستقرين حاليًّا. لم تُستنزف سوى نسبة ضئيلة من الأوزون خارج المناطق القطبية، ولا يمكن معرفة مقدار استنزافه فوق المنطقة الاستوائية.

ليس هناك علاقة واضحة بين تركيز الأوزون ومتوسط درجة حرارة كوكب الأرض؛ فحدوث استنزاف كبير لطبقة الأوزون يمكن أن يؤثر سلبًا على حياتنا، لكن ليس له علاقة كبيرة بتغير المناخ أو الاحترار العالمي؛ إذ تخضع درجة حرارة طبقة التروبوسفير في الكواكب لمدى فاعلية امتصاص الغلاف الجوي السفلي للأشعة تحت الحمراء. ويرجع ذلك إلى أن ضوء الشمس المرئي يعمل على تسخين سطح الكوكب؛ ومن ثم ينطلق من هذا السطح أشعة تحت حمراء. وتعتمد درجة حرارة الغلاف الجوي على عاملين: الحرارة التي يكتسبها الغلاف الجوي من خلال احتكاكه بالسطح، ومقدار الأشعة تحت الحمراء التي بمقدوره امتصاصها.

معظم أنواع الغازات تسمح بنفاذ الأشعة تحت الحمراء، لكن الجزيئات التي تتكون من عنصرين مختلفين أو أكثر تمتص الأشعة تحت الحمراء بقوة؛ ومن ثم لا يمتص النيتروجين N_2 والأكسجين O_2 والأرجون Ar الأشعةَ تحت الحمراء، لكن بخار الماء H_2O وثاني أكسيد الكربون CO_2 وثاني أكسيد الكبريت SO_2 والميثان CH_4 يمتصها.

ونظرًا لأن هذا يشبه احتجاز الحرارة داخل صوبة أو دفيئة، أُطلق على هذا التأثير «تأثير الدفيئة». يوجد تأثير دفيئة طبيعي في الغلاف الجوي لكواكب الزهرة والأرض والمريخ. وفي الأساس، بفضل احتواء الغلاف الجوي لكوكب الزهرة على كميات هائلة من ثاني أكسيد الكربون، يعمل تأثير الدفيئة في هذا الكوكب على رفع درجة حرارة سطحه بنحو ٥٠٠ درجة مئوية فوق ما كانت ستصبح عليه لولا ذلك. ويعمل بخار الماء وثاني أكسيد الكربون على رفع درجة حرارة كوكب الأرض بنحو ٣٠ درجة مئوية، ولا يتجاوز الارتفاع في درجة الحرارة نتيجة تأثير الدفيئة في كوكب المريخ — الذي له غلاف جوي رقيق غني بثاني أكسيد الكربون — إلا نحو ست درجات مئوية.

ويعمل تأثير الدفيئة في كوكب الأرض على احتفاظ الكوكب بدرجة حرارة مناسبة لمظاهر الحياة المختلفة الموجودة على سطحه. وبتأثير مظاهر الحياة نفسها، تغيرت قوة تأثير الدفيئة للإبقاء على درجة الحرارة ضمن معدلاتها المناسبة؛ فمنذ أربعة مليارات سنة، لم تكن تتجاوز درجة سطوع الشمس ٧٠٪ مقارنة بما هي عليه الآن؛ ومن ثم كان سيصبح كوكب الأرض أكثر برودة بكثيرٍ لو أن الغلاف الجوي ظل كما هو إلى يومنا هذا. لكن قبل أربعة مليارات سنة، كان الغلاف الجوي مكوَّنًا في معظمه — على الأرجح — من ثاني أكسيد الكربون، وكانت كثافته أكثر بمائة ضعف من كثافته اليوم؛ ومن ثم كان تأثير الدفيئة أقوى بكثير. وبفضل الطحالب الأولية، تضاءل محتوى ثاني أكسيد الكربون بنحو ١٠ أضعاف مقداره الحالي، وذلك قبل نحو نصف مليار سنة، وبطبيعة الحال، لا بد أن يكون تأثير الدفيئة قد انخفض أيضًا. ظهر الأكسجين الحر O_2، للمرة الأولى، منذ فترة تتراوح بين ٢٫٢ إلى ٢٫٧ مليار سنة، وبلغ ذروته ليصل إلى نحو ١٧٠٪ من تركيزه الحالي منذ فترة تتراوح بين ٢٥٠ و٢٠٠ مليون سنة. من الواضح أن الحياة على سطح كوكب الأرض قد أثَّرت على التغييرات الحادثة في تركيب الغلاف الجوي واستفادت منها.

منذ بداية الحقبة الصناعية، أثَّر النشاط البشري على الغلاف الجوي بطرق شتى؛ مثل استنزاف الأوزون والضباب الدخاني الصناعي وغير ذلك. ومع ذلك، أهم ما يجب أن

يشغلنا هو إطلاق غاز ثاني أكسيد الكربون إلى الغلاف الجوي، أو بالأحرى «عودته» مرة أخرى إلى الغلاف الجوي؛ إذ إن معظمه هو في الأساس ثاني أكسيد كربون استُخلص سابقًا من الغلاف الجوي عن طريق الكائنات الحية واختُزن في صورة فحم أو نفط. ومقدار ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي زاد بنحو ٢٠٪ خلال الخمسين عامًا منذ عام ١٩٦٠ (وذلك بمعدل أسرع من أي عملية طبيعية)، ولا يزال يزداد. وتأثير الدفيئة هذا، الناتجُ عن النشاط البشري، سوف يؤدي حتمًا إلى احترار مناخ الكوكب؛ فارتفاع درجة الحرارة بضع درجات سوف يؤثر على الأنظمة البيئية، وسوف يؤدي في الأغلب إلى جعل الطقس (بما يشمل تقلبات درجات الحرارة قصيرة الأمد) أكثر تطرفًا. ثمة نتيجة أخرى تتمثل في ارتفاع مستوى سطح البحر على ظهر الكوكب. ويرجع هذا — في الأساس — إلى أن الماء يتمدد كلما زادت درجة حرارته؛ لذا بالرغم من أن تأثير الدفيئة الطبيعي في غلافنا الجوي شيء جيد، فيمكن أن تؤدي الزيادات السريعة في حجم التأثير، الناتجة عن النشاط البشري، إلى نتائج كارثية على الحضارة الإنسانية.

وعلى خلفية تناقصٍ تدريجيٍّ عامٍّ في تأثير الدفيئة الطبيعي، الذي يقابل الزيادة البطيئة في سطوع الشمس، حدث العديد من التغيرات الملحوظة في مناخ كوكب الأرض. وتُعد العصور الجليدية التي تَجمَّد فيها جزء كبير من المياه السطحية (في ظروف متطرفة) أوضح وأبرز مثال على ذلك. وهذه التغيرات لا تخضع لتأثير الغلاف الجوي بقدرِ ما تخضع للتغيرات الحادثة في ميل محور الأرض ولاتراكزية المدار. وربما تفسِّر تأثيراتٌ مماثلةٌ التغيراتِ الشديدةَ الحادثةَ في درجة رطوبة سطح كوكب المريخ على مر الزمن.

(٨-٢) السُّحُب

السحب عاكسة بدرجة كبيرة؛ لذا كلما زادت درجة تلبُّد الغلاف الجوي بالسحب زادت كمية الطاقة الشمسية التي تنعكس مباشرة نحو الفضاء، لكن تزيد السماء الملبدة بالسحب قدرة الغلاف الجوي على احتجاز الحرارة من أشعة الشمس التي تصل إلى سطح الكوكب «فعليًّا»؛ ومن ثم فإن تأثير السحب على درجة حرارة الكوكب تأثير معقد؛ فالسحب المتصلة في كوكب الزهرة لم تنجح في حماية سطح الكوكب من الاكتواء بنار تأثير الدفيئة.

تتشكل السحب عندما تعمل درجة الحرارة والضغط معًا على جعل الظروف مواتية لمكوِّنٍ ما من مكونات الغلاف الجوي كي يتكثف على صورة قطيرات سائلة أو جسيمات ثلجيةٍ. وفي حالة الكواكب الأرضية، عادة ما يكون الماء هو هذا المكون. وبالرغم من أن الماء لا يمثل سوى جزء ضئيل من الغلاف الجوي لكوكب الزهرة، فيكفي هذا الماء لتشكيل طبقة متصلة من السحب أعلى طبقة التروبوسفير في هذا الكوكب بين نحو ٤٥ و٦٥ كيلومترًا أعلى السطح. في تلك المنطقة، يتكثف بخار الماء في صورة قطيرات يبلغ قُطرُها ميكرومترين. هذه القطيرات تظل معلقة لأنها تكون صغيرة جدًّا بحيث لا يمكن أن تسقط، ويُطلق عليها قطيرات الضبوب (الهباء الجوي)، ويذوب ثاني أكسيد الكبريت الجوي فيها، فتتحول إلى حمض كبريتيك، بيْدَ أنه إذا أخبرك شخص بأن السماء تمطر حمضًا كبريتيًّا في كوكب الزهرة، فاعلم أنه مخطئ؛ فحيثما تُسحب القطيرات إلى أسفل بمقدار ٤٥ كيلومترًا عن طريق دوران الغلاف الجوي، تؤدي الحرارة إلى تبخرها من جديد، ولا تحظى أبدًا بفرصة أن تصبح قطرات مطر كبيرة بما يكفي لسقوطها على سطح الكوكب.

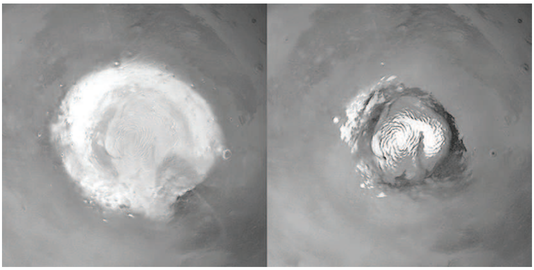
وفوق ارتفاع نحو ٦ كيلومترات، تتكون سحب الأرض في أغلبها من جسيمات ثلجية صغيرة، وتحت هذا الارتفاع، تكون في الغالب عبارة عن قطيرات ماء. والسحب الممطرة ليست رمادية في حقيقة الأمر؛ إنها تبدو كذلك لأنها تكون سميكة بما يكفي لحجب قدر كبير من الضوء. ومن النادر نسبيًّا أن تتشكل السحب في كوكب المريخ؛ ففي أغلب طبقة التروبوسفير من هذا الكوكب، تكون السحب عبارة عن جليد مائي، لكن على مسافة نحو ٨٠ كيلومترًا بالقرب من الحاجز الفاصل بين طبقتَي التروبوسفير والميزوسفير، رُصدت سحب مكونة من ثاني أكسيد الكربون.

(٨-٣) الأغطية الجليدية القطبية والمحيطات

إضافة إلى تكاثف مكونات الغلاف الجوي من أجل تكوين السحب، يمكن أن تتكاثف هذه المكونات لتصبح ثلجًا أو سائلًا عند السطح. والمعروف إلى يومنا هذا أن كوكب الأرض هو الوحيد بين الكواكب الأرضية الذي به محيطات، والتي هي بطبيعة الحال مكوَّنةٌ من ماء. وبالقرب من القطبين، يتجمد الماء من أجل تشكيل أغطية جليدية قطبية. وربما يكون كوكب الزهرة الناشئ قد مرَّ بحقبة قصيرة غطَّت فيها المحيطات سطحه،

قبل أن يزيد بخار الماء المتطاير (الذي تَبدَّد بعد ذلك بفعل التفكك الضوئي) من تأثير الدفيئة المتنامي؛ ما أدى إلى موقف الجفاف الحالي.

لكنَّ وضْع كوكب المريخ مختلف. وفكرة وجود محيط «أوقيانوس بورياليس» الشاسع، الذي يُعتقد أنه شغل السهول الشمالية المنخفضة من الكوكب بالكامل منذ نحو ٣٫٨ مليارات سنة؛ شاعت في فترة التسعينيات من القرن العشرين. وبالرغم من أن هذا لا يزال أمرًا محل جدل، فيمكن أن يقبل كثيرون احتمالية تواجُد بحيرات على كوكب المريخ كانت واسعة بما يكفي لأن يُطلق عليها «بحار»، عندما كانت تتدفق قنوات كتلك الموضحة في الشكل رقم ٢-١١، وربما بقيت حتى بعض الآثار المتجمدة التي غطاها التراب (انظر الشكل رقم ٢-٨). ومع ذلك، ليس هناك شك في أن الجليد يتواجد على السطح حاليًّا في الأغطية القطبية للكوكب (انظر الشكل رقم ٢-١٤). وهذه الأغطية القطبية تتكون من جليد مائي «دائم» مع القليل من الصقيع المكوَّن من ثاني أكسيد الكربون، والذي يزيد ويقل موسميًّا.



شكل ٢-١٤: صورتان تغطيان منطقة بعرض ١٥٠٠ كيلومتر من الغطاء القطبي الشمالي لكوكب المريخ: الأولى للمنطقة في بداية الربيع (الصورة اليسرى)، والثانية وهي في ذروة الصيف (الصورة اليمنى). في الصيف، يتحول معظم صقيع ثاني أكسيد الكربون من ثلج إلى بخار، ولا يترك سوى ما تبقى من غطاء «دائم» من الجليد المائي.

وتتفاعل الأغطية القطبية لكلٍّ من كوكبَي الأرض والمريخ مع الغلاف الجوي. وهذه الأغطية في الواقع عبارة عن رواسب من الغازات التي تنفصل عن الغلاف الجوي؛ إما بالسقوط من السحب على هيئة ثلج، وإما تتكاثف مباشرة على السطح. وعندما ترتفع

درجة الحرارة، تعود مادة الأغطية القطبية إلى الغلاف الجوي؛ إما عن طريق الانصهار والتبخر بعد ذلك (فيما يتعلق بالماء على سطح الأرض، أو ربما على سطح المريخ في الماضي)، وإما عن طريق التحول مباشرة من ثلج إلى بخار (بالنسبة لثاني أكسيد الكربون والماء على سطح المريخ اليوم).

لا يمكن أن تحدُث توازنات كهذه على الأجرام السماوية العديمة الهواء مثل القمر وكوكب عطارد؛ ومن ثم لا يُتوقع أن يحتوي هذان الجرمان على مثل هذه الأغطية القطبية، بيد أنه خلال فترة التسعينيات من القرن العشرين، لوحظ أن إشارات الرادار تنعكس بقوة غير معتادة من مناطق ظليلة دائمًا داخل فوهات بالقرب من قطبَي كلا الجرمين. وهذا يتسق مع الجليد المائي المتناثر على شكل حبيبات داخل الحطام الصخري. ثمة تفسير محتمل، وهو أن أسطح هذه الفوهات تكون باردة جدًّا، لدرجة أن أي جزيئات ماء شاردة بالجوار تميل للالتصاق في الغالب بالسطح في «مصائد مبردة». ولا يحتاج هذا الماء لأنْ يكون جزءًا أصيلًا من هذه الأجرام؛ فمن الممكن أن يكون قد تم توريده لاحقًا عن طريق المذنبات الصادمة. والعثور على مصدر ماء على سطح القمر أمر له أهميته البالغة إذا أُريد لمستعمرة بشرية، أو حتى مجرد قاعدة بشرية دائمة، أن تتواجد هناك. واحتمالات وجود ماء في القطبين هي الأقوى. وفي عام ٢٠٠٩، تم التأكد من وجود ماء في عمود مقذوفات تَشكَّل عندما اصطدمت مركبة فضاء بفوهة قطبية ظليلة دائمًا؛ فالأطياف تحت الحمراء التي تم الحصول عليها بواسطة مركبة فضاء أخرى أظهرت وجود ماء وأملاح معدنية مُمَيَّهة على نحو متفرق في الحطام الصخري في مناطق أوسع نطاقًا، وذلك بتركيزات بسيطة، إلا أن هذا يحيي الآمال باحتمال وجود حياة على سطح القمر، وذلك على خلافِ ما كان يُعتقد في السابق.

(٩) الدورات

التفاعل بين لب الكوكب وسطحه وغلافه الجوي ودوران المكونات بينها أمر مهم للغاية. و«الدورة الهيدرولوجية» (دورة الماء) لكوكب الأرض هي أوضح مثال على ذلك. وهي ليست دورة واحدة، لكنها مجموعة من الدورات المترابطة. عمومًا، يتبخر الماء الموجود في المحيطات ليكون سحبًا، ثم يتكثف لاحقًا ليسقط على هيئة مطر أو ثلج؛ ليشق طريقه عائدًا إلى المحيطات مرة أخرى (من خلال الأنهار أو الأغطية القطبية الموسمية). ويمكن أن يُسحب الماء إلى لب الكوكب (إما أن يصل إلى العمق في مناطق الانغراز، وإما أن يكون

ضحلًا عندما يتسرب من السطح للداخل) ويخرج من جديد عن طريق البراكين. ويمكن أن يتفاعل كيميائيًّا أيضًا مع الصخر (التجوية الكيميائية) ويُختزن داخل المعادن. هناك أيضًا «دورة كربونية» مهمة ذات مراحل مترابطة تتعلق بثاني أكسيد الكربون الموجود في الغلاف الجوي، والنباتات والحيوانات الحية، وثاني أكسيد الكربون المذاب، والحجر الجيري البحري، والرواسب الهيدروكربونية، والغازات البركانية، وما إلى ذلك.

من المؤكد أن كوكب المريخ تحدُث به دورات مماثلة، بالرغم من أنها تحدث على نحو متقطع أكثر، وعلى نطاقات زمنية مختلفة، وبأهمية نسبية مختلفة لكل مرحلة من مراحل الدورة. الأرجح أنه توجد حتى دورات أبطأ تتعلق بثاني أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكبريت على كوكب الزهرة، وفيها يعمل الغلاف الجوي على تجوية صخور السطح التي تُطمر في نهاية المطاف بتدفقات الحمم البركانية لأعماق تُحرَّر فيها الغازات من جديد، وتعود إلى الغلاف الجوي من خلال الفوهات البركانية. وإلى أن نستكشف ونوثق التعقيدات والنطاقات الزمنية لهذه الدورات المتعددة المراحل والمترابطة، سوف يظل فهمنا لطبيعة كل كوكب قاصرًا.

الفصل الثالث

الكواكب العملاقة

الكواكب العملاقة هي الأجرام المهيمنة على المجموعة الشمسية؛ شريطة اعتبار الحجم هو الشيء المهم، والاستعداد للتغاضي عن الشمس نفسها. ويَعْرض النصفُ السفلي من الشكل رقم ٢-١ الكواكبَ العملاقة الأربعة بنفس مقياس الرسم، وهو يبين إلى أي مدًى يُعد حجمها كبيرًا مقارنة بالكواكب الأرضية. وقد الْتُقط منظر كوكب أورانوس بواسطة تليسكوب هابل الفضائي الموجود في مدار حول كوكب الأرض، في حين تظهر الكواكب العملاقة الأخرى كما رُصدت بواسطة مركبات فضائية اقتربت منها. وليست كتلة هذه الكواكب سببًا في تميُّزها لأنها أقل كثافة من الكواكب الأرضية؛ فلا تزيد كثافة كوكب المشتري على ٢٤٪ من كثافة كوكب الأرض، بل إن كوكب زحل أقل كثافة، وربما يطفو إذا سقط في مسطح مائي افتراضيٍّ كبيرٍ بما يكفي. وجميع هذه الكواكب لها حلقات في مستواها الاستوائي، بالرغم من أن حلقات كلٍّ من زحل وأورانوس هي فقط البارزة بما يكفي بحيث تكون مرئية في الشكل رقم ٢-١. وبالرغم من أن الحلقات تبدو صلبة، فإنها تتشكل من كم هائل من الجسيمات الدوارة، وهي ضعيفة للغاية. والفصل الرابع يسلط الضوء على هذه الحلقات، إضافة إلى الأقمار التابعة للكواكب العملاقة.

ومن المتعارف عليه أن حجم أي كوكب عملاق يقاس بدءًا من قمة سُحُبه، وتوجد هذه السحب في طبقة التروبوسفير الخاصة بالكوكب، والتي يعلوها طبقات شفافة ذات كثافة تتناقص باستمرار، وهي قابلة للتصنيف بنفس الطريقة التي يتم بها التعامل مع الغلاف الجوي لكوكب الأرض. وقاعدة طبقة التروبوسفير في الكوكب العملاق يصعب تحديدها، ولم يتم استكشافها قط حتى في حالة كوكب المشتري؛ إذ إنه في عام ١٩٩٥

وصل مسبار أطلقته مركبة الفضاء «جاليليو» إلى عمق ١٦٠ كيلومترًا أسفل قمم السحب قبل أن يحطمه الضغط (ضغط ٢٢ غلافًا جويًّا معًا)، ودرجة الحرارة (١٥٣ درجة مئوية). الأرجح أن طبقة التروبوسفير في الكوكب العملاق تندمج بإحكام مع الجزء الداخلي المائع في درجات حرارة وضغوط مرتفعة جدًّا، لدرجة لا يمكن التمييز عندها بين الغاز والمائع. وبالتأكيد ليس هناك سطح صلب استطاع أن يقف عليه إنسان قط.

الجدول رقم ٣-١ يعرض البيانات الأساسية الخاصة بالكواكب العملاقة. والأقطار القطبية المذكورة أقل من الأقطار الاستوائية؛ لأن معدل الدوران السريع (انظر جدول رقم ١-٢) يؤدي إلى تسطُّح أشكالها. والقطر القطبي لكوكب المشتري أقل بنسبة ٦٫٥٪ من قطره الاستوائي، والقطر القطبي لكوكب زحل أقل بنسبة ١٠٪ من قطره الاستوائي. ولا يزيد الفارق على نحو ٢٪ في حالة كوكبَي أورانوس ونبتون الأقل غازية، والأكثر بطئًا في الدوران (وأقل من ١٪ بالنسبة لكل كوكب أرضي).

(١) باطن الكواكب العملاقة

ليست هناك طريقة بسيطة تتم بها دراسة باطن الكواكب العملاقة، لكن يمكننا استخدام تركيب الغلاف الجوي (٩٩٪ هيدروجين وهليوم)، ومعرفتنا العامة بتركيب المجموعة الشمسية ككلٍّ، من أجل بناء نموذج يتوافق مع الكثافة المقاسة لتلك الكواكب، ومع الضغوط الداخلية التي يمكن أن نستنتجها بناءً على هذا. لا بد أن كل كوكب عملاق يمتلك أسفل غلافه الجوي منطقة تتكون في الأساس من جزيئات هيدروجين H_2 وذرات هليوم He، في حالة يكون من الأفضل أن نطلق عليها «مائعة» بدلًا من «سائلة» أو «غازية». وفي المركز، يوجد على الأرجح لب داخلي صخري تبلغ كتلته نحو ثلاثة أضعاف كتلة كوكب الأرض في حالة كوكبَي المشتري وزحل، وتُعادل كتلة كوكب الأرض في حالة أورانوس ونبتون. ولا بد أنه يحيط باللب الداخلي لبٌّ خارجي من «الجليد» مكوَّن من نسب غير معلومة من الماء والأمونيا والميثان، يعادل نحو ضعفَي كتلة كوكب الأرض في حالة كوكب المشتري، وربما يعادل ستة أضعاف كتلة كوكب الأرض في حالة كوكب زحل، واثني عشر ضعفًا في حالة كوكب أورانوس، وخمسة عشر ضعفًا في حالة كوكب نبتون. ولا ندري ما إذا كانت هذه الألباب الخارجية والداخلية منصهرة أم جامدة؛ لأنه بالرغم من قدرتنا على تقدير الضغط (٥٠ مليون ضغط جوي في مركز كوكب المشتري)، فنحن لا نعلم تركيبها، وليست لدينا سوى فكرة غامضة عن درجة الحرارة المحتملة

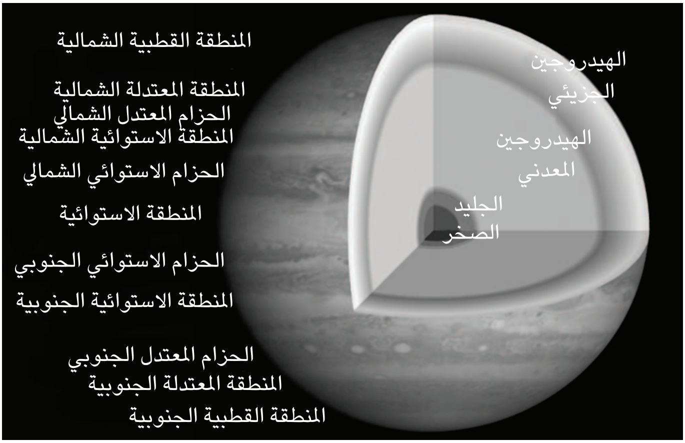
جدول ٣-١: البيانات الأساسية الخاصة بالكواكب العملاقة. لاحِظ أن وحدات الكتلة أكبر ألف مرة منها في حالة الكواكب الأرضية الموضحة في الجدول رقم ٢-١.

	الكتلة (10^{27}كجم)	القطر القطبي (كم)	الكثافة (10^{3}كجم م$^{-3}$)	الجاذبية عند قمم السحب (م.ث$^{-2}$)	درجة الحرارة عند قمم السحب (درجة مئوية)
المشتري	١,٩٠	١٣٣,٧٠٠	١,٣٣	٢٣,١	−١٥٠
زحل	٠,٥٦٩	١٠٨,٧٢٠	٠,٦٩	٩	−١٨٠
أورانوس	٠,٠٨٦٨	٤٩,٩٤٠	١,٣٢	٨,٧	−٢١٤
نبتون	٠,١٠٢	٤٨,٦٨٠	١,٦٤	١١,١	−٢١٤

(التي تتراوح بين ما يزيد على ١٥ ألف درجة مئوية في مركز كوكب المشتري، ونحو ٢٢٠٠ درجة مئوية في الحافة الخارجية من لب كوكب نبتون). وفهْمنا لسلوك المواد في ظل ظروف متطرفة كهذه فَهمٌ قاصر؛ فنحن لا نعرف ما إذا كان الحديد المعدني يمكن أن يختلف عن الصخر ويغوص نحو المركز لتكوين لب داخلي. وربما يكون حتى لب كلٍّ من أورانوس ونبتون عبارة عن كتل ممتزجة غير متمايزة من الجليد والصخر.

وتزيد كتلة الأجزاء الخارجية من كوكبَي أورانوس ونبتون المُكوَّنة من الهيدروجين والهليوم على كتلة كوكب الأرض بقدر يسير، وهذه الأجزاء تشمل هياكل يبلغ سمكها ٦ آلاف كيلومتر. ومع ذلك، يوجد لدى كلٍّ من «العملاقين الغازيين» — المشتري وزحل — غطاءٌ أكثر عمقًا بكثير؛ يتكون من الهيدروجين والهليوم، ويحيط باللب الخاص به، وتزيد كتلته على كتلة كوكب الأرض بـ ٣٠٠ و٨٠ ضعفًا، على التوالي. وتطويع الهيدروجين أسهل من تطويع الجليد أو الصخر. والعلماء على يقين من أنه في ظل ضغوط تزيد على نحو مليونَي ضغط غلاف جوي، تنضغط ذرات الهيدروجين بإحكام شديد معًا، لدرجة أن الإلكترونات تتحرر من الارتباط بذرات بعينها. وعوضًا من ذلك، تستطيع الإلكترونات التجول في بحر من الهيدروجين يسلك سلوك المعادن المنصهرة. وحرية حركة الإلكترونات هذه تجعل «الهيدروجين المعدني» موصلًا ممتازًا للكهرباء. والأرجح أن هيكلًا من الهيدروجين المعدني (مع بعض الهليوم المذاب فيه) الذي يحيط بلب كوكب المشتري تعادل كتلته نحو ٢٦٠ ضعفًا من كتلة كوكب الأرض (أي ٨٠٪ من الكتلة الإجمالية لكوكب المشتري)، في حين يُعتقد أن كتلة الهيكل المحيط بلُبِّ كوكب زحل لا تُعادل سوى ٤١ ضعفًا من كتلة كوكب الأرض (أي أكثر من ٤٠٪ من الكتلة الإجمالية لكوكب زحل). ويسلط الشكل رقم ٣-١ الضوء على التركيب الداخلي الكامل لكوكب المشتري.

وربما لا يزال التركيب الداخلي للكواكب العملاقة في حالة من التطور؛ لأنها — ربما باستثناء كوكب أورانوس — تطلق جميعًا حرارة إلى الفضاء أكثر من الحرارة التي تستقبلها من الشمس. وكوكب المشتري ضخم جدًّا للدرجة التي يمكن أن تجعله قادرًا إلى الآن على أن يطلق كمًّا كبيرًا من الحرارة البدائية المحتجزة منذ نشأته. أما بالنسبة لزحل ونبتون، فإن فائض الحرارة هذا يبين أن الحرارة تتولد فعليًّا بداخلهما. والتباين كبير جدًّا لدرجة لا تجعلها حرارة إشعاعية المنشأ؛ لذا التمايز الداخلي قد لا يزال قائمًا. وغوص المادة الأكثر كثافة عن المتوسط نحو الداخل (ما يسمح بنشوء هيكل داخلي في



شكل ٣-١: رسم تخطيطي يبين الطبقات الداخلية المفترضة داخل كوكب المشتري. موضح بالرسم أسماء المناطق (ذات اللون الفاتح) والأحزمة (ذات اللون الداكن) الرئيسية الخاصة بقمم السحب في طبقة التروبوسفير.

حين يصبح الهيكل المحيط أرق وأنقى) يمكن أن يحوِّل طاقة وضع الجاذبية إلى حرارة. ويمكن أن تصدر هذه الحرارة من النمو المستمر للُّب (أو اللُّب الداخلي)، أو — في حالة كوكب زحل فقط — من غوص قطيرات الهليوم إلى داخل طبقة الهيدروجين المعدني للكوكب.

(٢) الأغلفة الجوية

(٢-١) التركيب

على النقيض من فهمنا القائم على أساس التكهُّن المعقول بشأن الأجزاء الداخلية للكواكب العملاقة، يمكن أن يعتمد فهمنا للأغلفة الجوية أكثر على الملاحظة والقياس. ويمكن قياس تركيب السحب والطبقات التي تعلوها عن طريق التحليل الطيفي، وهو دراسة الكيفية التي يُمتص بها الضوء الشمسي ذو الأطوال الموجية المختلفة عند أعماق مختلفة داخل الغلاف الجوي. بالإضافة إلى ذلك، يمكن تحديد متوسط الكتلة الجزيئية عند

كل عمق من خلال مقدار الانكسار الذي يحدث للإشارات اللاسلكية التي ترسلها مركبة فضاء بينما تختفي عن الأنظار خلف الكوكب. كذلك أجرى مسبار «جاليليو» العديد من القياسات داخل الغلاف الجوي لكوكب المشتري خلال هبوطه عليه. ويعقد الجدول رقم ٣-٢ مقارنة بين الأغلفة الجوية للكواكب العملاقة الأربعة من حيث تركيبها الكيميائي. وإضافة إلى الأنواع المذكورة بالجدول، يحتوي كل غلاف جوي على كميات أصغر من الأسيتيلين C_2H_2، ويحتوي الغلاف الجوي لكوكب المشتري على الإيثيلين C_2H_4، ويحتوي الغلاف الجوي لكلٍّ من المشتري وزحل على الفوسفين PH_3، وأول أكسيد الكربون CO، والجيرمان GeH_4.

جدول ٣-٢: الغازات المكتشفة في الأغلفة الجوية للكواكب العملاقة، مع توضيح النسبة المقاسة التي يشكلها كلٌّ منها.

	المشتري	زحل	أورانوس	نبتون
الهيدروجين H_2	٠٫٩٠	٠٫٩٦	٠٫٨٣	٠٫٨٠
الهليوم He	٠٫١٠	٠٫٠٣	٠٫١٥	٠٫١٩
الميثان CH_4	٣ × ١٠^{-٣}	٤٫٥ × ١٠^{-٣}	٠٫٠٢٣	٠٫٠١٥
الأمونيا NH_3	٣ × ١٠^{-٤}	١ × ١٠^{-٤}	—	—
الماء H_2O	٤ × ١٠^{-٦}	أقل من ٢ × ١٠^{-٩}	—	—
كبريتيد الهيدروجين H_2S	أقل من ١ × ١٠^{-٧}	أقل من ٢ × ١٠^{-٧}	—	—
الإيثان C_2H_6	٦ × ١٠^{-٦}	٢ × ١٠^{-٧}	—	١٫٥ × ١٠^{-٦}
السحب المرئية	الأمونيا	الأمونيا	الميثان	الميثان

والطبقة العليا من السحب المتصلة على كوكبَي أورانوس ونبتون تتكون من جسيمات ثلج الميثان. وهذه الطبقة تكون دافئة جدًّا بحيث تمنع تكاثف الميثان على كوكبَي المشتري وزحل، في حين تتكاثف جسيمات ثلج الأمونيا لتشكيل السحب العليا. ويبلغ سمك طبقات السحب العليا هذه نحو ١٠ كيلومترات، والتي يصبح «الهواء» أسفل منها صافيًا من جديد على الأرجح. وتشير الحسابات إلى أنه في حالة كوكب المشتري، لا بد

أن تكون هناك طبقة ثانية من السحب المكونة من بيكبريتيد الأمونيوم NH_4HS أسفل الطبقة الأولى بنحو ٣٠ كيلومترًا، وطبقة سحابية ثالثة مكونة هذه المرة من الماء (جليد في أعلاها وقطيرات ماء سائل في أسفلها) تقع أسفل الطبقة الثانية بنحو ٢٠ كيلومترًا. وقد اكتشف مسبار «جاليليو» سحبًا من بيكبريتيد الأمونيوم — على الأرجح — في العمق المناسب تقريبًا، لكنه لم يعثر على أي سحب من ثلج الماء. يقول البعض إن تلك النماذج خاطئة، في حين يقول البعض الآخر إن المسبار اخترق فجوة تفصل بين سحب متقطعة من ثلج الماء. ويُتوقع أن تكون هناك نفس طبقات السحب في كوكب زحل، لكن المسافة بين كل طبقة وأخرى تكون أكبر بنحو ثلاثة أضعاف؛ لأن جاذبية كوكب زحل أقل من جاذبية كوكب المشتري. والسحب الحاملة للأمونيا يُتوقع أن توجد أسفل سحب الميثان في كلٍّ من كوكبَي أورانوس ونبتون.

الضغط الجوي عند قمة سحب الأمونيا في كوكب المشتري أقل بمعامل قدرُه مرتان أو ثلاث مرات عن الضغط الجوي عند مستوى سطح البحر على كوكب الأرض، في حين يقترب الضغط عند قمم السحب على الكواكب العملاقة الأخرى من الضغط الجوي عند مستوى سطح البحر على كوكب الأرض.

(٣-٢) دوران الغلاف الجوي

يمكن رصد نمط عام من الأشرطة السحابية التي تتحرك بموازاة خط الاستواء على كوكب المشتري حتى عند استخدام تليسكوب صغير. ويتكرر نمط مشابه على نحو أقل وضوحًا في الكواكب العملاقة الأخرى. ولا بد أن يكون للتسخين الشمسي دورٌ ما في دوران هذا الجزء المرئي من أغلفتها الجوية، لكن يبدو أن هذا الدوران يحدث — في الأغلب — بفعل الحرارة الداخلية، ويخضع لمعدل دوران الأغلفة الجوية السريع حول محور الكواكب.

عادة ما يُطلق على الأشرطة الداكنة من السحب اسم «الأحزمة»، وعلى الأشرطة الفاتحة التي تتخللها اسم «المناطق». عَرَضَ الشكل رقم ٣-١ لأسماء الأحزمة والمناطق الرئيسية على كوكب المشتري. ولأنه ليس هناك سطح صلب يقوم مقام الإطار المرجعي، تقاس سرعات الرياح على الكواكب العملاقة استنادًا إلى متوسط معدل دوران الكوكب حول محوره. وعلى كوكب المشتري، تهب الرياح التي تعلو قمم السحب صوب الشرق بسرعة تصل إلى ١٣٠ مترًا في الثانية عبر أغلب المنطقة الاستوائية. وحواف الأحزمة

الشمالية والجنوبية المتاخمة لها نفس هذه الحركة، لكن سرعة الريح تتناقص وتعكس اتجاهها في نهاية الأمر، مع الابتعاد عن خط الاستواء عبر كل حزام إلى أن تصل إلى المناطق الاستوائية؛ حيث ينعكس اتجاه الرياح مرة أخرى، وهكذا تتكرر عملية تغيير الاتجاهات عبر كل حزام وكل منطقة إلى أن يتم الوصول إلى المناطق القطبية.

في مناطق كوكب المشتري، يرتفع الغلاف الجوي في الغالب؛ ما يؤدي إلى تكاثف سحب الأمونيا لأعلى حيث تبدو بطبيعة الحال لامعة. وعلى العكس، ينخفض الغلاف الجوي في الغالب في الأحزمة؛ حيث تنسحب قمم السحب إلى أسفل وصولًا إلى مستوى عمق تظهر عنده أكثر قتامة. وقد تم التعرف على استثناءات لهذا النمط على كوكب المشتري. ويبدو أن هذه القاعدة العامة للمناطق الصاعدة والأحزمة الهابطة قلما تنطبق على الكواكب العملاقة الأخرى، التي يكون من الأصعب فيها فهْم دوران الأغلفة الجوية. ثمة عامل يزيد الأمرَ تعقيدًا، ويؤثر على القدرة على رصد المناطق والأحزمة، وهو القصور في فهم طبيعة وكم المركبات التي تضيف لونًا للسحب، والتي يُتوقع أن تكون ناتجة عن التفاعلات الكيميائية الضوئية؛ فمن الممكن أن يُعزَى اللونان الأحمر والأصفر لسحب كوكب المشتري إلى الكبريت (الذي ينطلق بفعل النشاط الكيميائي الضوئي إما من كبريتيد الهيدروجين وإما من هيدروكبريتيد الأمونيا)، أو الفوسفور (من الفوسفين)، أو الهيدرازين (N_2H_4، الذي ينتج بفعل النشاط الكيميائي الضوئي من الأمونيا).

والتنويعات اللونية أقل وضوحًا في الغلاف الجوي لكوكب زحل، كما أن نمط المناطق والأحزمة أقل بروزًا، لكن سرعات الرياح تكون أعلى؛ حيث تزيد سرعة الرياح التي تهب صوب الشرق على ٤٠٠ متر في الثانية، وتتوغل حتى ١٠ درجات على أيٍّ من جانبَي خط الاستواء.

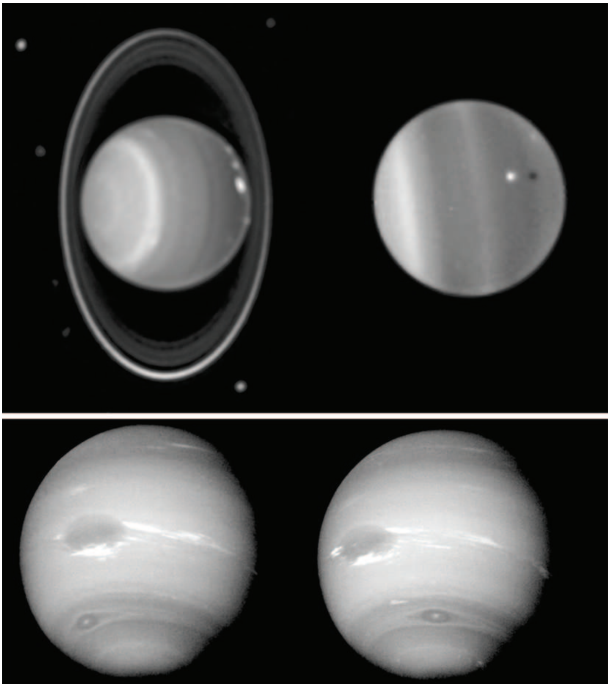
وأنظمة العواصف الدوارة شائعة جدًّا في كلٍّ من كوكبَي المشتري وزحل. وأشهر تلك الأنظمة نظام «البقعة الحمراء العظيمة» في كوكب المشتري، والذي يمكن ملاحظته في الشكل رقم ٢-١ على هيئة بقعة بيضاوية تمتد في الحاجز بين الحزام الاستوائي الجنوبي والمنطقة الاستوائية الجنوبية. وتغطي هذه البقعة ٢٦ ألف كيلومتر من الشرق إلى الغرب، ويكون شكلها حلزونيًّا، وتستغرق نحو ستة أيام للدوران في عكس اتجاه عقارب الساعة. وتظهر تلك البقعة في المشاهدات التليسكوبية — على الأقل — منذ عام ١٨٣٠. ويمكن أن تتشكل عواصف أصغر حجمًا بنطاقات مختلفة على كلٍّ من كوكبي المشتري (انظر طول الحزام المعتدل الشمالي في الشكل رقم ٣-١) وزحل. وغالبًا

ما يتشوه شكل كوكب زحل — مرة كل ٣٠ عامًا، تقريبًا، خلال الصيف في نصفه الشمالي — بفعل نظام عواصف عملاق يبدأ على هيئة بقعة بيضاء بالقرب من خط الاستواء، لكنه يمكن أن ينتشر خلال شهر ليحيط بالكوكب قبل أن يختفي عن الأنظار تدريجيًّا.

وفي حين يبدو كلٌّ من كوكبَي المشتري وزحل مائلين للصفرة، يبدو كوكبا أورانوس ونبتون أخضرين مائلين للزرقة؛ وذلك يرجع إلى أننا نرى قمم سحبهما من خلال طبقة توجد تحتهما من غاز الميثان الذي يمتص الضوء (الأحمر) ذا الأطوال الموجية الأطول.

وميل محور كوكب أورانوس بمقدار ٨٢٫١ درجة يؤدي إلى تباين جامح في الظروف المناخية الموسمية؛ فعلى سبيل المثال، عندما مرت مركبة الفضاء «فويدجر ٢» — وهي مركبة الفضاء الوحيدة التي زارت كوكب أورانوس إلى الآن — بالكوكب في عام ١٩٨٦، كان القطب الجنوبي مغمورًا تمامًا بضوء الشمس، وكان يعاني أغلب النصف الشمالي من الكوكب عقودًا من الظلام. وفي الصور التي التقطتها «فويدجر»، بدا النصف الجنوبي من الكوكب بلا ملامح واضحة؛ ما أثار حالة من الإحباط، لكن بمرور الوقت خلال العام، ومع بدء الشمس في الشروق والغروب على نطاق أوسع من دوائر العرض، أضحى الكوكب أكثر شبهًا بالكواكب العملاقة الأخرى (انظر الشكل رقم ٣-٢). وفي عام ٢٠٠٧، مر كوكب أورانوس باعتداله (أي تَساوِي ليله ونهاره)، وبدأ القطب الجنوبي الذي تبعه تدريجيًّا بقية النصف الجنوبي في الدخول في ظلام طويل الأمد سيبلغ ذروته في منتصف الشتاء الجنوبي عام ٢٠٢٨.

وعندما اتضحت تفاصيل كوكب نبتون خلال رحلة «فويدجر ٢» عام ١٩٨٩ التي مرَّت بجانبه، كان الكوكب أشبه بنسخة زرقاء من كوكب المشتري، بل إنه كان يوجد به نظام عواصف عملاق في صورة بقعة مظلمة تقع جنوب خط الاستواء، حملت اسم «البقعة المظلمة العظيمة»، وذلك على غرار «البقعة الحمراء العظيمة» الخاصة بكوكب المشتري، لكن هذه البقعة ثبت أنها قصيرة الأمد، وقد تلاشت بالفعل بحلول عام ١٩٩٤. وعلى العكس من كلٍّ من كوكبَي المشتري وزحل، تهب الرياح الاستوائية على كوكب نبتون باتجاه الغرب (على عكس دوران الكوكب حول محوره)، كما يُرى من خلال الانحراف جهة الغرب للبقعة المظلمة العظيمة مقارنةً بالبقعة الأصغر حجمًا، والأكثر قربًا من الجنوب البادية في الشكل رقم ٣-٢.



شكل ٣-٢: المنظر العلوي: كوكب أورانوس كما تم رصده بواسطة تليسكوب هابل الفضائي في أغسطس ١٩٩٨ (الصورة اليسرى)، ويوليو ٢٠٠٦ (الصورة اليمنى). ويتضح التغير الحادث في اتجاه محور الكوكب بالنسبة إلى الشمس من نمط أشرطة الغلاف الجوي. والمنطقة المحيطة بالقطب الجنوبي كانت لا تزال في ضوء الشمس في عام ١٩٩٨، لكن المحور أصبح مواجهًا للشمس بزاوية، وذلك بحلول عام ٢٠٠٦. وتظهر السحب اللامعة العالية في أقصى شمال الصورة التي الْتُقطت عام ١٩٩٨، التي تُظهر أيضًا الحلقات والعديد من الأقمار الداخلية. وكانت الحلقات غير مرئية في عام ٢٠٠٦، لكننا عوضًا عن ذلك يمكننا أن نرى أحد الأقمار الأساسية (أرييل) وظله. المنظر السفلي: صورتان لكوكب نبتون التقطتهما مركبة الفضاء «فويدجر ٢» خلال اقترابها منه عام ١٩٨٩. وتبرز البقعة المظلمة العظيمة وما يرتبط بها من حزم السحب النيتروجينية الرقيقة المرتفعة واللامعة. لاحظ أيضًا التركيب الشريطي العام، ووجود بقعة مظلمة أصغر حجمًا مع التوغل جنوبًا.

(٣) الأغلفة المغناطيسية

لكل كوكب عملاق مجال مغناطيسي قوي. و«العزم المغناطيسي الثنائي القطب» لكوكب نبتون، وهو المقياس التقليدي لمجال الكواكب المغناطيسي، أكبر ٢٥ ضعفًا من العزم المغناطيسي الثنائي القطب لكوكب الأرض. وبالنسبة لكلٍّ من أورانوس وزحل والمشتري، يعادل هذا العزم المغناطيسي على الترتيب ٣٨ و٥٨٢ و١٩٤٩ ضعفًا من العزم المغناطيسي الثنائي القطب لكوكب الأرض. ولتوليد هذه المجالات المغناطيسية، من المفترض أن يحتوي كل كوكب على نطاق به مائع موصل للكهرباء، يخضع لنوعٍ ما من الحركة عن طريق الحمل الحراري. ويرجع المجال المغناطيسي في كوكبَي عطارد والأرض إلى الهيكل المائع المحيط باللب الحديدي لكلٍّ منهما. أما المجالان المغناطيسيان الخاصان بالمشتري وزحل، فيتولدان — على الأرجح — في طبقة الهيدروجين المعدني، ويتحركان بفعل الدوران السريع نسبيًّا للكوكبين. وتكون الضغوط منخفضة جدًّا بالنسبة للهيدروجين المعدني في كوكبَي أورانوس ونبتون؛ ومن ثم يكون من الصعوبة تقدير مجاليهما المغناطيسيين، لكن يتولد هذان المجالان المغناطيسيان — على الأرجح — بفعل الحركة داخل «الجليد» الموصل للكهرباء الموجود في اللب الخارجي لكلا الكوكبين.

ومن النتائج المترتبة على امتلاك الكوكب مجالًا مغناطيسيًّا (وهو الأمر الذي ينطبق على كوكبَي عطارد والأرض) أنه يحصر الكوكب داخل نطاق لا تستطيع خطوط المجال المغناطيسي من الشمس أن تخترقه في الغالب. وهذا النطاق يُطلق عليه «الغلاف المغناطيسي» للكوكب. ومسارات الجسيمات المشحونة في الرياح الشمسية (التي هي في الأساس البروتونات والإلكترونات) تخضع للمجال المغناطيسي للشمس إلى أن تصطدم الجسيمات بـ «الانحناء الصدمي» للغلاف المغناطيسي للكوكب، الذي يحوِّل مسارها بعيدًا عن الكوكب.

ويمكن أن تَعْبر الجسيماتُ المشحونة الكوكبَ في بعض الأحيان، لا سيما عن طريق التسرب من الكوكب عبر الذيل المغناطيسي الطويل في الاتجاه المغاير للشمس. وبالقرب من القطبين، يمكن أن تتفرع هذه الجسيمات على طول خطوط المجال باتجاه قمة الغلاف الجوي؛ حيث يتسبب وصولها إلى هذه المنطقة في حدوث توهُّج في السماء يُطلق عليه الشفق، وهو ظاهرة معروفة جيدًا في كوكب الأرض، وقد تم رصده أيضًا في كلٍّ من المشتري وزحل.

الفصل الرابع

أقمار وحلقات الكواكب العملاقة

تشترك جميع الكواكب العملاقة الأربعة في امتلاكها حلقات ومجموعة كبيرة من الأقمار التابعة، وتوجد تنويعات من تلك الحلقات والأقمار بناءً على الأهمية والحجم، لكن أوجه التشابه بين الأنظمة الحلقية القمرية تفوق أوجه الاختلاف.

(١) الأنظمة الحلقية القمرية

تتحرك معظم الأقمار الخارجية التابعة لكل كوكب عملاق في مدارات لا تراكزية، وتكون حركتها عادةً في الاتجاه المعاكس لدوران الكوكب الذي تتبعه. والعديد من هذه المدارات يكون مائلًا بدرجة تزيد على ٣٠ درجة بالنسبة إلى خط استواء الكواكب التي تتبعها تلك الأقمار. وقد أطلق على هذه الأجرام اسم «الأقمار غير النظامية» نظرًا لأن مداراتها تكون في المعتاد لا تراكزية ومائلة، وتدور في الاتجاه العكسي، فضلًا عن حقيقة أن جاذبيتها ضئيلة لدرجة لا تمكِّنها من أن تحتفظ بشكل كروي (يبلغ أقصى قطر لها نحو ١٠٠ كيلومتر، وفي أغلب الأحيان لا يتجاوز بضعة كيلومترات). والأقمار غير النظامية هي الفئة الأكثر عددًا؛ فوفقًا لآخر التقديرات، يتبع كوكبَ المشتري ٥٥ قمرًا بأنصاف محاور رئيسية مدارية تتراوح بين ١٠٥ إلى ٤٠٠ ضعف نصف قطر المشتري، ويتبع كوكبَ زحل ٣٨ قمرًا بمدارات تتراوح بين ١٨٤ و٤١٧ ضعفًا من نصف قطر زحل، ويتبع كوكبَ أورانوس ٩ أقمار بمدارات تتراوح بين ١٦٧ و٨١٨ ضعفًا من نصف قطر أورانوس، ويتبع كوكبَ نبتون ٦ أقمار بمدارات تتراوح بين ٢٢٣ و١٩٥٤ ضعفًا من نصف قطر نبتون.

«الأقمار النظامية» الكبيرة الحجم تدور في مدارات في عكس اتجاه عقارب الساعة، وتكون هذه المدارات أقرب إلى الكواكب التابعة لها تلك الأقمار، وبدرجات ميل منخفضة

جدًّا. ويتبع كوكبَ المشتري أربعةُ أقمار نظامية (تلك التي اكتشفها جاليليو) تتراوح أنصاف محاورها الرئيسية المدارية بين ٥٫٩ إلى ٢٦٫٣ ضعفًا من نصف قطر المشتري. وهذه عوالم كبيرة، وهي تشترك في الكثير من الخصائص الجيولوجية مع الكواكب الأرضية، بالرغم من أنها لا تفي بمتطلبات الاتحاد الفلكي الدولي المؤهلة لها كي تُصنف ضمن الكواكب. ويتبع كوكبَ زحل ثمانيةُ أقمار نظامية (جميعها باستثناء واحد فقط أصغر حجمًا بكثير من أقمار المشتري، وتتراوح مداراتها بين ٣ و٥٩ ضعفًا من نصف قطر زحل)، ويتبع كوكبَ أورانوس ٥ أقمار نظامية (تتراوح مداراتها بين ٥ و٢٣ ضعفًا من نصف قطر أورانوس). ويتبع نبتون قمرٌ نظاميٌّ واحدٌ كبيرٌ يطلق عليه تريتون يبلغ مداره ١٥ ضعفًا من نصف قطر الكوكب. وبالرغم من أن هذا القمر «نظامي»، فإنه يتميز بدورانه العكسي. ثمة سمة مهمة تجمع بين الأقمار النظامية كافة (بما فيها تريتون)، وهي أن قوى المد تتحكم فيها بحيث تدور حول محورها دورانًا متزامنًا، بمعدل دورة حول نفسها مرة كل دورة حول الكوكب الذي تتبعه، وبذلك تجعل وجهها مواجهًا دائمًا لكوكبها (مثلما هو الحال في القمر الأرضي).

وبالاقتراب أكثر، نجد كتلًا من حطامٍ ذاتَ أشكال غير منتظمة يكون من السهل تمييزها باعتبارها «قميرات داخلية». وهذه القميرات تدور في مدارات دائرية استوائية في عكس اتجاه عقارب الساعة. وهكذا الحال بالنسبة للجسيمات التي تتشكل منها الحلقات. ونظرًا لأن بعض مدارات القميرات الداخلية تقع ضمن الحلقات، لا يوجد — على الأرجح — فارق جوهري بين جسيم حلقة كبيرة وقمير داخلي صغير. ولا يتبع كوكبَ المشتري سوى أربعة قميرات داخلية معروفة، لكن زحل يتبعه ١٤ قميرًا، منها سبعة قميرات تقع مداراتها بين مدارات أقماره النظامية الداخلية. ويتبع كوكبَ أورانوس ١٣ قميرًا، وأما نبتون فيتبعه ٦.

ويتباين عرض وعدد الحلقات من كوكب إلى آخر، مع كون حلقات كوكب زحل هي الأبرز والأكثر إبهارًا إلى الآن، لكن بوجه عام لا يتجاوز سمكها بضع عشرات الكيلومترات. وفي الأغلب تكون هذه الحلقات أقرب إلى كوكبها من مسافة تُعرف باسم «حد روش»، وهو حد تدمِّر فيه قوى المد أيَّ جرم كبير يدخل في نطاق الكوكب. ويُنظر إلى معظم الحلقات باعتبارها حطامًا متخلفًا من التدمير المدي لقمر أو مذنب شرد مقتربًا بشدة من الكوكب، لكن من الواضح أن بعض الحلقات الأصغر حجمًا يكون مصدرها أقمارًا قريبة، وتتشكل من جسيمات تذرَّى بقوة في الفضاء أو تلقي بها اصطدامات.

وتتكون حلقات كوكب زحل من جليد، وتعكس نحو ٨٠٪ من ضوء الشمس الذي يسقط عليها، وبالرغم من مظهرها البارز (انظر الشكل رقم ٢-١)، فإن المادة الموجودة بداخلها لن تكفي إلَّا لتشكيل جرم يبلغ قطره ١٠٠ كيلومتر، إذا فرضنا أننا جمعناها معًا بشكل كامل. وبالرغم من أن جسيمات كل حلقة لم يتم تصويرها تصويرًا مباشرًا، فإن المعدل الذي تبرد به الحلقات، عندما يسقط عليها ظِل الكوكب الذي تتبعه، يشير إلى أن حلقات كوكب زحل هي — في الأغلب — جسيمات يتراوح حجمها بين سنتيمتر واحد وخمسة أمتار. وعلى النقيض من ذلك، تتكون حلقات كوكب المشتري الأصغر حجمًا — في الأغلب — من جسيمات ذات أحجام ميكرومترية، تكون أيضًا أقل قدرة بكثير على عكس ضوء الشمس مقارَنةً بالكتل الجليدية اللامعة لحلقات كوكب زحل. وتعكس المادة التي تتشكل منها الحلقات في كوكبَي أورانوس ونبتون ضوء الشمس بدرجة سيئة (مثل مادة حلقات كوكب المشتري)، لكن حجمها — في الأغلب — يتراوح بين سنتيمترات وأمتار (مثل مادة حلقات كوكب زحل).

ويؤدي الرنين المداري إلى تفاعل جذبوي معقد بين الحلقات والقميرات الداخلية التي تدور بينها (انظر شكل ٤-١). وغالبًا ما يُطلق على هذه اسم «الأقمار الرعاة»؛ لأن البعض منها يشغل الكثير من الفجوات الموجودة في الحلقات، والبعض الآخر يشكل حلقات ضيقة ويشوهها، ويمنع مداراتها من الخروج عن مدارات تلك الأقمار أو الشرود بعيدًا عنها.

وبوجه عام، تكون الحلقات أقرب إلى كوكبها منها إلى الأقمار النظامية التابعة، لكن كوكب زحل يعد استثناءً؛ إذ إن له حلقة خارجية غير منتظمة تتكون من مادة قاتمة غبارية تتمركز حول مدار فوبي؛ وهو أحد الأقمار الداخلية غير النظامية. والمادة التي تشكلت منها هذه الحلقة التي اكتُشفت عام ٢٠٠٩، باستخدام تليسكوب يعمل بالأشعة تحت الحمراء موجود في الفضاء، يُعتقد أن مصدرها القمر فوبي، وإن كانت الكيفية التي حدث بها ذلك ليست مفهومة إلى الآن.

(٢) أقمار مثيرة للاهتمام

في وقت من الأوقات، كان الجميع تقريبًا يتوقعون أن تكون حتى أكبر الأقمار التابعة للكواكب الخارجية أجرامًا موحشة، فكان يُعتقد أن الكرات الجليدية القديمة المليئة بحفر كثيفة نتيجة الاصطدامات ربما تسجِّل تاريخ قصف الكواكب الخارجية من المجموعة



شكل ٤-١: منظر يغطي جزءًا عرضه ٥ آلاف كيلومتر من النظام الحلقي لكوكب زحل، الذي تم رصده بواسطة بعثة الفضاء «كاسيني» في ٢٧ يوليو ٢٠٠٩. وبمقياس الرسم هذا، يتعذر تمييز انحناء الحلقات حول الكوكب (خارج المنظر جهة اليمين). تعكس الحلقات معظم ضوء الشمس حيث تحتشد الجسيمات بكثافة شديدة، ويظهر الفضاء الأسود من خلال الفجوات الخالية من الجسيمات. والقمر «بان» — قمر راعٍ يبلغ قطره ٢٨ كيلومترًا — يمكن رؤيته وهو يدور في أوسع فجوة. وإضافة إلى شَغْل هذا القمر معظمَ هذه الفجوة، فإنه يمارس تأثيره على الحلقات الضيقة والمتقطعة داخل الفجوة. والطول الاستثنائي لِظِل هذا القمر الساقط على الحلقات الموجودة على يمينه يرجع إلى أن هذه الصورة الْتُقطت عندما كانت الشمس قريبة جدًّا من مستوى الحلقات.

الشمسية، لكنها لم تكن مثيرة للاهتمام ما لم يكن المرء يرغب في دراسة التطور المداري المشترك لتلك الكواكب. كانت هذه هي الرؤية الشائعة حتى ٢ مارس ١٩٧٩، عندما نشر ستانتون بيل؛ من جامعة كاليفورنيا (بالتعاون مع زميلين آخرين)، بحثًا يُبيِّن أن الرنين المداري الذي نسبته ٢:١ بين آيو وأوروبا؛ قمرَي جاليليو الداخليَّيْن التابعَيْن لكوكب المشتري، لا بد أنه يؤدي إلى قدر هائل من التشوُّه المدي في شكل القمر آيو إلى الدرجة التي يصبح عندها محتواه الداخلي مصهورًا. وبناءً على تقديرات الكثافة إضافة إلى التحليل الطيفي لأسطح الأقمار التابعة للمشتري، تَبين بالفعل أن القمر آيو له قشرة صخرية على العكس من الأقمار التابعة الأخرى التي يسودها الجليد. وافتراض وجود

محتوًى مصهور داخل جسم صخري (ترتفع فيه درجة حرارة الانصهار ارتفاعًا شديدًا) كان بمنزلة خطوة شديدة الجرأة. وربما لم يكن سيصدِّق هذا الزعمَ سوى قلة قليلة لولا قيام مركبة الفضاء «فويدجر ١» برحلة بعد ذلك بعدة أيام، وبثها صورًا لبراكين ثائرة تعلوها أعمدة الرماد البركاني بارتفاع ٣٠٠ كيلومتر.

وبالرغم من أن التسخين المدي للقمر آيو هو الأقوى إلى الآن، تؤثر نفس العملية على الكثير من الأقمار الأخرى، بل وهناك عدد أكبر منها يحمل دلائل لحالات تسخين مدِّي وقعت لها في الماضي. وهذا يجعلها متنوعة ومثيرة لاهتمام الجيولوجيين الذين لا يُمانعون في الاعتقاد بأنه في أغلب هذه الأقمار يكون اللب وحده مكونًا من الصخر، والذي يحاط بدثار جليدي سميك يحتمل أن يكون مزودًا بقشرة جليدية متمايزة كيميائيًّا عند السطح. وفي ظل درجات حرارة السطح المنخفضة التي تسود الكواكب الخارجية (التي تتراوح بين ١٤٠ درجة مئوية تحت الصفر بالنسبة لأقمار المشتري و٢٣٥ درجة مئوية تحت الصفر بالنسبة لأقمار نبتون)، تكُون الخواص الميكانيكية وسلوك انصهار الجليد مشابهَين إلى حدٍّ بعيدٍ للكيفيةِ التي يكون عليها سلوك الصخر في الكواكب الداخلية من المجموعة الشمسية. بعبارة أخرى، يكون لدى هذه الأجرام نفس سلوك وتركيب الكواكب الأرضية مع إحلال الصخر محل الحديد في اللب، والجليد محل الصخر في القشرة والدثار.

ويعد القمر آيو استثناءً لكونه خاليًا من الجليد، ولامتلاكه قشرة ودثارًا صخريين يحيطان بلب حديدي، وكان من الممكن أن يُصنف باعتباره كوكبًا أرضيًّا لو أنه كان يدور حول الشمس وليس حول كوكب المشتري. والقمر أوروبا هجين؛ إذ يمتلك تركيبًا مماثلًا للقمر آيو، وهو مطمور تحت ما يتراوح بين ١٠٠ إلى ١٥٠ كيلومترًا من الجليد. وفيما يلي سأتناول هذين القمرين وبعض الأقمار الأخرى التي هي مثار إعجابي، مع التركيز على الأمثلة الأكثر حيوية، بالرغم من أنه حتى الكرات الجليدية التي بها فوهاتٌ اتضح أنها أكثر إثارة للاهتمام من الأجرام الكروية الكئيبة المتخيَّلة في السابق.

(٢-١) آيو

لا يزيد حجم أو كثافة القمر آيو على حجم وكثافة قمرنا الأرضي إلَّا بقدر طفيف (يبلغ قطر آيو ٣٦٤٢ كيلومترًا)، لكن توجد اختلافات هائلة بينهما؛ فسطح القمر آيو تغير بسرعة كبيرة بفعل العمليات البركانية إلى حد أنه لا تُرى فوهة صدمية واحدة، بالرغم من

حقيقة أن تأثير جاذبية كوكب المشتري في تركيز المقذوفات الشاردة نحو الداخل، لا بد أن يكون معناها أن القمر آيو قد تعرض لاصطدامات أكثر من القمرين الكثيفَي الفوهات: جانيميد وكاليستو، اللذين يدوران خلف القمر أوروبا. وفي عام ١٩٧٩، عندما دُرست الصور المقربة الملونة للقمر آيو، التي التقطتها بعثة «فويدجر ١» الأولى، جعل لونُه الأصفرُ الكثيرين يفترضون أن تدفقات الحمم البركانية المفصصة التي أمكن التعرف عليها على سطحه مُكوَّنةٌ من الكبريت. ومع ذلك، فمن المسلَّم به حاليًّا أن براكين القمر آيو عبارة عن مادة سليكية منصهرة («صخر» حقيقي). ودرجات الحرارة المسجلة في قلب الفوهات البركانية الثائرة تزيد على ١٠٠٠ درجة مئوية، بالرغم من البرودة الشديدة فيما وراء المناطق النشطة. والغاز الذي يتسرب ليسبب اندلاع الثورات البركانية، كتلك المبينة في الشكل رقم ٤-٢، يكون في الأساس ثاني أكسيد الكبريت (بينما يكون في أغلبه بخار ماء على كوكب الأرض)، ويتكثف كلٌّ من الكبريت وثاني أكسيد الكبريت على السطح في صورة «صقيع» يضفي اللون الأصفر على القمر آيو.

ويقع القمر آيو ضمن حزام من الجسيمات المشحونة يحدها المجال المغناطيسي لكوكب المشتري، ويكون الإشعاع هناك قويًّا بشدة إلى الحد الذي جعل مراقبي بعثة «جاليليو»، التابعة لوكالة ناسا، لا يسمحون للمركبة بتكرار عملية المرور عن قرب من قمر آيو؛ ومن ثم لم تُلتقط صور جيدة إلَّا لجزء صغير من القمر آيو، بحيث أظهرت تفاصيل لمساحة لا يتجاوز حجمها بضع مئات الأمتار. وفي أكثر الصور تفصيلًا، لم يَزِدْ قطر البكسلات عن ١٠ أمتار، وحتى في هذه الصور لم يُعثر على أي فوهات صدمية.

وإذا كان معدل النشاط البركاني الحالي على قمر آيو معبرًا عن نشاطه على المدى الطويل، فلا بد أن قشرته ودثاره بالكامل قد تغيرا عدة مرات؛ فتغطية الأسطح الأقدم بتدفقات حمم بركانية وغبار متساقط من أعمدة الانفجار البركاني، التي تصل إلى متوسط معدل طمر عامٍّ يُقدَّر ببضعة سنتيمترات في العام، تطمس معالم الفوهات الصدمية بسرعة شديدة إلى الحد الذي لا تظهر عنده أيٌّ منها. وإذا فُرض وكان للقمر آيو طبقة خارجية من الجليد، فإن النشاط البركاني أدى إلى تبخرها منذ وقت طويل، لتتبدد في الفضاء؛ لأن جاذبية هذا القمر تكون ضعيفة إلى الحد الذي لا يمكِّنها من الاحتفاظ ببخار ماء أو أي غاز خفيف آخر. وقمر آيو كان سيصبح مكانًا مذهلًا يزوره علماء البراكين، لكن البيئة الإشعاعية القاسية جعلت سطحه غير ملائم تمامًا للاستكشاف البشري.



شكل ٤-٢: الصورة العلوية: جزء من القمر آيو وهو في طور الهلال كما رصدته بعثة «نيو هورايزونز» الفضائية، التي كانت معنية في الأساس بكوكب بلوتو ومرت بكوكب المشتري في مارس ٢٠٠٧. ويرتفع عمود الرماد البركاني من فوهة بركانية في موقع يُطلق عليه كالديرا «تفشتار» في الجانب الليلي المظلم إلى نحو ٣٠٠ كيلومتر، بحيث يكون جزؤه العلوي في ضوء الشمس. ويمكن رؤية وهج متقد من منبعه. والجزء السفلي المظلل من العمود مضاء إضاءة خافتة عن طريق الضوء المنعكس من كوكب المشتري. الصورة السفلية: منظر يغطي مساحة عرضها ٢٥٠ كيلومترًا من تفشتار الْتُقط قبل المنظر السابق بثماني سنوات، وذلك بواسطة بعثة «جاليليو» الفضائية، وضوء الشمس يأتي من جهة اليسار. وأكثر المواد قتامة عبارة عن تدفقات حمم بركانية حديثة، والخط اللامع المتجه من الشرق للغرب بالقرب من الجزء العلوي الأيسر عبارة عن حمم بركانية متوهجة ثارت من صدع بركاني.

(٢-٢) أوروبا

أوروبا هو القمر المفضل لدي، وهو قمر يبلغ قطره ٣١٣٠ كيلومترًا. والصور التي التقطتها مركبة الفضاء «فويدجر» من خلال تحليقها بالقرب من القمر في عامَي ١٩٨٠ و١٩٨١ أظهرت سطحه على شكل قشرة بيض مشقوقة، مع وجود عدد قليل جدًّا من

الفوهات الصدمية. من الواضح أن التسخين المدي جدَّد الطبقة الخارجية الجليدية للقمر، بالرغم من أن هذا لم يحدث بنفس السرعة الهائلة التي حدث بها في حالة القمر آيو. والصور العالية الوضوح التي التقطتها بعثة «جاليليو» أظهرت تاريخًا لسطح معقد، وأثارت جدلًا شديدًا؛ فقد كان معلومًا بالفعل أن سطح القمر أوروبا مكون في الأساس من جليد مائي. وتُبين الكثافة الكلية لهذا القمر أن سمك هيكله الجليدي لا بد أنه يتراوح بين ١٠٠ و١٥٠ كيلومترًا، وهو يعلو محتوًى داخليًّا صخريًّا أكثر كثافة، لكن الجدل بشأن الكثافة لا يمكن أن يميز بين الجليد الصلب والماء السائل؛ فجليد السطح قوي وسهل التفتُّت بفضل انخفاض درجة حرارته. والجدل الذي ثار تمحور حول حالة «الجليد» أسفل السطح. فهل كان في حالة تجمد وصولًا إلى الصخر، أم أن الجزء السفلي منه سائل مغطًّى بهيكل جليدي طافٍ؟

والاحتمال الثاني يتطلب معدلًا أكبر للتسخين المدي الداخلي جنبًا إلى جنب مع التصور الغريب لمحيط هائل من الماء السائل أسفل الجليد. وأرى أن الأدلة المُستقاة من صورِ كَتِلْك المبينة في الشكل رقم ٤-٣ توضح أن الجليد رقيق بوجه عام، ولا يتجاوز سمكه بضعة كيلومترات؛ ومن ثم لا بد أنه يطفو فوق الماء، لكن على مدار السنوات العديدة التي استغرقتها الجولة المدارية لمركبة الفضاء «جاليليو» حول منظومة كوكب المشتري، أصرت مجموعة معارضة قوية في فريق التصوير على محاولة توضيح خصائص السطح؛ باعتبارها ناتجة عن عمليات يحفزها الحمل الحراري في الحالة الصلبة في الطبقة الجليدية السميكة.

وما يعد الآن الأساس المقبول بوجه عامٍّ لجيولوجيا القمر أوروبا يمكن توضيحه على نحو رائع بالرجوع إلى الشكل رقم ٤-٣؛ فالشكل يبين العديد من «أطواف» الجليد الثابتة التي لها حواف يبلغ ارتفاعها ١٠٠ متر. وأسطح هذه الأطواف الجليدية تتميز بنمط من النتوءات والأخاديد يسير في اتجاهات متنوعة. وبين الأطواف الجليدية، تكون البنية أكثر فوضوية وتفتقر إلى نمط واضح. وتوجد مساحات كبيرة من القمر أوروبا (وراء هذه المنطقة) لم تنقسم إلى أطواف، ويكون نمط السطح فيها نتوءات وأخاديد متصلة. ومن الواضح أن الأطواف الجليدية الموجودة في الشكل رقم ٤-٣ عبارة عن أجزاء متكسرة من هذا النوع من المساحات. وقد نتج نمط النتوءات والأخاديد عن فتح وغلق الشقوق بين الأطواف الجليدية، اللذين يَحدُثان — على الأرجح — في دورة مدية تتزامن مع الفترة المدارية للقمر، والتي تكون كل ٣,٦ أيام. وبوجه عام، يمكن أن تصبح بعض



شكل ٤-٣: صورة مقربة تغطي مساحة تبلغ ٤٢ كيلومترًا من جزء من منطقة كونامارا كيوس في القمر أوروبا؛ حيث سمح «تخلل الانصهار» من المحيط الموجود أسفل السطح بانجراف أطواف الجليد بعيدًا بعضها عن بعض قبل أن تتجمد المنطقة من جديد. وضوء الشمس يأتي من جهة اليمين.

الشقوق نشطة في أي وقت من الأوقات؛ فعندما ينفتح شق (ربما بعرض متر واحد أو ما شابه)، يُسحب الماء من أسفل لأعلى. والماء المكشوف مؤقتًا للفضاء البارد الموجود أعلى الشق يغلي ويتجمد على نحو متزامن، لكنه سرعان ما يصبح مغطًّى بالوحل. وعندما ينغلق الشق، يخرج بعض الوحل إلى السطح مشكِّلًا نتوءًا فوق الشق المنغلق. وفي المرة التالية التي ينفتح فيها الشق، ينشق النتوء ويضاف إليه المزيد من الوحل عندما ينغلق الشق مرة أخرى. وتكفي بضع سنوات من الفتح والانغلاق كي تحيط نتوءات بالحجم الذي نراه بأخاديد مركزية. وفي نهاية المطاف تنغلق الشقوق على نحو دائم، لكن يبدأ شق جديد في النشاط في مكان آخر؛ ومن ثم يتشكل النمط معطِيًا السطح المحتوي على نتوءات وأخاديد والمُغطِّي لجزء كبير من القمر أوروبا شكلًا يشبه كرة من الخيط.

يبين الشكل رقم ٤-٣ الاضطراب الذي يحدث لسطح «كرة الخيط» بفعل عملية مهمة أخرى تؤثر على القمر أوروبا. هذه العملية يُطلق عليها اسم «تخلل الانصهار»، وهي تؤدي إلى مزيج فوضوي من الأطواف الجليدية المتكسرة يُطلق عليه «فوضى». وتحت أي منطقة فوضى تتشكل مستقبلًا، يصبح المحيط دافئًا على نحو غير عادي

— ربما يرجع ذلك إلى الثورات البركانية السليكية في قاع المحيط — وتنصهر قاعدة الهيكل السطحي الجليدي تدريجيًّا، ويصبح الجليد أقل سمكًا. وفي نهاية المطاف، يصل الانصهار إلى السطح، وتنفصل الأطواف الجليدية عن الحواف المكشوفة من الهيكل الجليدي، وتنجرف نحو المحيط المكشوف. وأي ماء مكشوف سرعان ما يتجمد من جديد، وربما يكون من الأفضل تصور أطواف جليدية ذات سمك يُقدر بكيلومتر تشق طريقها نحو بحر مغطًّى بوحل جليدي، وليس مسطحًا مائيًّا مكشوفًا مثل الذوبان الصيفي لسرب جليدي في المحيط القطبي الشمالي على كوكب الأرض. وفي الجزء الشمالي الغربي من الشكل رقم ٤-٣، يمكنك أن ترى الطريقة التي تجمعت بها في الأساس العديدُ من الأطواف الجليدية؛ لأنها لم تنجرف بعيدًا بعضها عن بعض كثيرًا، ويمكن مطابقة بنيات «كرة الخيط» الخاصة بكلٍّ منها.

وبعد زوال الزيادة المؤقتة في درجة الحرارة، يتجمد المحيط من جديد وتتوقف الأطواف الجليدية عن الانجراف، ويبدأ جليد سطح البحر المعاد تجمده الموجود أسفل الأطواف الجليدية في اكتساب مزيد من السُّمك مرة أخرى. وعندما تصبح المنطقة المعاد تجمدها سميكة وهشة بما يكفي، يمكن أن تنفتح شقوق جديدة، ويبدأ جيل جديد من بنيات كرة الخيط في الظهور فوق المنطقة بأكملها. وفي الشكل رقم ٤-٣، يوجد شق ناشئ تتاخمه سلسلة نتوءات ضيقة على كل جانب من الجانبين، ويكون هذا الشق قُطري الاتجاه، وهو يبدو عاديًّا عند عبوره الأطواف الجليدية، ولكن يمكنك أن تستنتج أنه ناشئ؛ لأنه يقطع البحر المُعادَ تجمُّده الواقع بين الأطواف الجليدية.

وحتى إن كانت هذه القصة تحمل قدرًا ضئيلًا من الصحة، فإنها تنطوي على بعض التبعات المثيرة للتفكير؛ فالتفاعلات الكيميائية مع الصخر الباطني ستجعل المحيط مالحًا — بالرغم من أن أكثر الأملاح المذابة وفرةً قد تكون كبريتات المغنيسيوم وليس كلوريد الصوديوم — كما في المحيطات الموجودة على كوكب الأرض. فأي محيط من نوعية المحيطات التي تعلو صخرًا ساخنًا بفعل التسخين المدي يوفر موطنًا ملائمًا لقيام حياة يماثل الموطن الذي يُعتقد أن تكون قد بدأت فيه الحياة على كوكب الأرض. وعدم وصول ضوء الشمس ليس عائقًا؛ لأن «الكائنات المنتجة الأولية» عند قاعدة السلسلة الغذائية يمكن أن تستمد طاقتها من اختلال التوازن الكيميائي، الذي يحدث للمحيط في ينابيع حارة مغمورة (مَنافس مائية حرارية). وهذه الحياة توصف بأنها تتعلق بالتمثيل الكيميائي في مقابل التمثيل الضوئي. وفي قيعان المحيطات على كوكب الأرض، يُطلق على

أكثر المنافس سخونة اسم «المداخن السوداء»؛ بسبب عمود جسيمات الكبريتيد المعدنية الذي يتشكل عندما يمتزج مائع المَنفس بماء المحيط. وهذه المنافس بمنزلة واحات مذهلة للحياة؛ حيث تتغذى مجتمعات الكائنات الحية (بما يشمل بعض الكائنات المتقدمة مثل الجمبري وسرطان البحر) على ميكروبات تعتمد على التمثيل الكيميائي، وتكتسب طاقتها عن طريق تحويل ثاني أكسيد الكربون إلى ميثان. وإذا كانت الحياة على كوكب الأرض بدأت في مثل هذه الظروف، فلماذا إذن لا يرجح حدوث ذلك على القمر أوروبا أيضًا؟

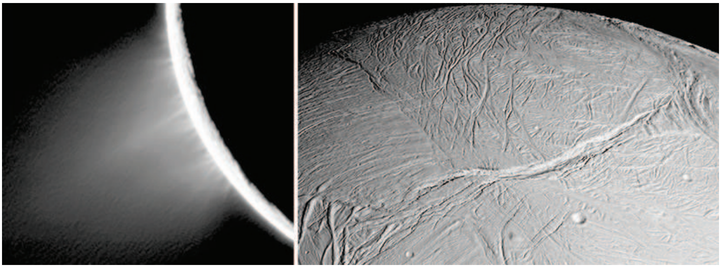
من الصعب جدًّا العثور على حياة مغمورة تحت الجليد الذي يبلغ سمكه عادةً عدةَ كيلومترات؛ وهو الأمر الذي يتطلب من الهابطين على القمر أوروبا ثقب أو صهر حفرة في الجليد لإدخال مسبار روبوتي يمكن أن يستقر في عمود «مدخنة سوداء». ومع ذلك، مثل هذه البعثة الطموحة قد لا تدعو إليها الحاجة بالضرورة إذا كانت النتوءات الموجودة على أيٍّ من جانبَي الشق الناشئ تَشكَّلت من الوحل الذي سُحب لأعلى من المحيط. وأثناء انفتاح الشق، يمكن أن يوفر موطنًا ملائمًا لقيام حياة تعتمد على التمثيل الضوئي لكائنات مثل النباتات أو الطحالب البحرية (وهو الأمر الأكثر معقولية). ومثل الحياة على كوكب الأرض، من الممكن أن تكون تلك الكائنات قد تطورت من أسلاف تعتمد على التمثيل الكيميائي. ويمكن أن يجعل الإشعاعُ بضعةَ السنتيمترات العليا من عمود الماء المكشوف غيرَ ملائمة للحياة، لكن يمكن أن يتوفر قدر كافٍ من ضوء الشمس لحدوث تمثيل ضوئي في بضعة الأمتار التالية. وإذا كانت هناك كائنات منتجة أولية (النباتات والطحالب) تعتمد في عيشها على ضوء الشمس، فمن المحتمل أن تكون هناك حيوانات تتغذى عليها. ولِتَبيُّن هذا الأمر، تتمثل الخطوة الأولى في فحص عينة من النتوء الذي يظهر خارج الشق.

والتعاون الكبير التالي الذي يمكن أن يتم بين وكالة ناسا الفضائية ووكالة الفضاء الأوروبية في مجال استكشاف الكواكب الخارجية من المجموعة الشمسية، من المرجح أن يكون بعثة فضائية إلى منظومة كوكب المشتري. وسوف يكون هدف تلك البعثة الأساسيُّ التحققَ من وجود محيط بالقمر أوروبا، باستخدام رادار مخترق للجليد، وعن طريق قياس مقدار الانحناء المدي (الذي قد لا يتجاوز نحو متر واحد في حالة الجليد السميك المستقر في القاعدة، وقد يصل إلى نحو ٣٠ مترًا بالنسبة لهيكل جليدي «رقيق» يطفو على سطح محيط). والمؤسف أنه لا يمكن التفكير في هبوط إحدى المركبات الفضائية على سطح القمر أوروبا بعدُ، لكن سوف يكون هناك على الأقل مطياف عالي الوضوح من المدار للبحث عن جزيئات بيولوجية المنشأ في مادة النتوء.

(٣-٢) إنسيلادوس

ربما كان سيصبح أسهل كثيرًا العثور على واسماتٍ بيولوجية لو كان ممكنًا الحصول على عينة من جليد القمر أوروبا دون الاضطرار إلى الغوص إلى السطح. ويتيح إنسيلادوس، وهو قمر تابع لكوكب زحل، هذه الفرصة. لا يتجاوز قطر هذا القمر ٥٠٤ كيلومترات، وله كثافة منخفضة انخفاضًا شديدًا؛ لدرجة أنه لا يحتوي على الكثير من الصخور. وقد أظهرت مركبة الفضاء «فويدجر» أن هذا القمر عالم صغير غريب، به فوهات كثيفة في أجزاء منه، لكن من الواضح أنه يفتقر إلى هذه الفوهات في أماكن أخرى. والصور الأعلى وضوحًا التي تم بثها عن طريق مركبة الفضاء «كاسيني»، التي بدأت استطلاعًا مداريًّا لمنظومة كوكب زحل في عام ٢٠٠٤؛ تُظهر سطحًا تقطعه العديد من التشققات المتنوعة (بالرغم من أن ذلك مخالف إلى حد بعيد لمناطق كرة الخيط في القمر أوروبا). كما أن المركبة اكتشفت تدفقات من بلورات جليدية تنطلق نحو الفضاء من الشقوق القريبة من القطب الجنوبي (انظر الشكل رقم ٤-٤). ولحسن الحظ أن «كاسيني» كانت تحمل معها مطيافًا كبيرًا مصممًا لدراسة الأيونات والجسيمات المحايدة؛ حيث تم تعديل مسار مركبة الفضاء بحيث يسمح لها باختراق العمود المائي الحراري والتقاط بعض العينات. وقد وُجد أن هذه العينات تحتوي على الماء والميثان والأمونيا وأول أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكربون. والأرجح أنه كانت هناك أيضًا بعض الجزيئات العضوية البسيطة، بالرغم من أن هذا مصطلح كيميائي يدل على ذرات كربون مرتبطة معًا، ولا يشير ضمنًا إلى أي أصل بيولوجي. ولو كانت عُرفت الأعمدة المائية الحرارية مسبقًا، لربما كانت اشتملت حمولة مركبة الفضاء «كاسيني» على أجهزة مناسبة على نحو أفضل لاكتشاف الواسمات البيولوجية.

وشبه مؤكد أن التسخين المدي (الذي يحفزه رنين مداري نسبته ١:٢ للقمر بعد التالي التابع لزحل، الذي يُطلق عليه اسم ديون) يحفز على تشكيل الشقوق ويعطي زخمًا للأعمدة المائية الحرارية. ومع ذلك، لم يتوقع أحد أن القمر إنسيلادوس بهذه الدرجة من النشاط. وهذا أمر محير على اعتبار أن ميماس، وهو القمر المجاور له والمشابه له في الحجم، عبارة عن كرة جليدية نمطية بها فوهات، وليس بها دلائل تشير إلى وجود تاريخ من النشاط. ومن غير المحتمل أن يكون بالقمر إنسيلادوس محيط كبير مخبوء أسفل سطحه، لكن ربما توجد أخاديد من الماء السائل أسفل منابع الأعمدة. والماء السائل مهم



شكل ٤-٤: صورتان للقمر إنسيلادوس التقطتهما مركبة الفضاء «كاسيني». الصورة اليسرى: منظر لهلال شديد الوضوح يُظهر عمودًا مائيًّا حراريًّا يمتد نحو ١٠٠ كيلومتر على الأقل فوق السطح. الصورة اليمنى: منظر مائل لجزء من القمر إنسيلادوس تظهر به العديد من الشقوق المتنوعة، كتلك التي من المعلوم أن العمود قد نشأ منها في الأساس، وعدد قليل من الفوهات الصدمية (التي هي صغيرة جدًّا بحيث لم تتمكن مركبة الفضاء «فويدجر» من رصدها) يبين أن هذه المنطقة لم تَعُد نشطة على الأرجح.

لوجود حياة، لكنَّ توفُّر المواد المغذية داخل إنسيلادوس يكون بالتأكيد أكثر محدودية بكثير منه داخل جرم كبير مثل القمر أوروبا؛ ومن ثم فإن إنسيلادوس لا يبدو موطنًا واعدًا للحياة.

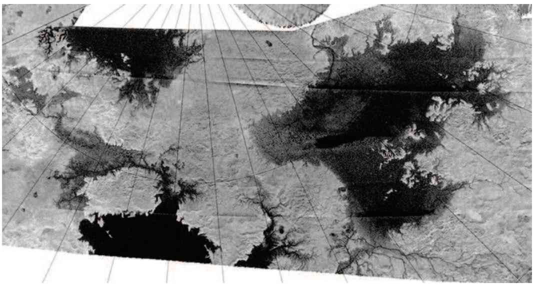
(٤-٢) تيتان

تيتان هو القمر الوحيد التابع لكوكب زحل الذي ينافس أقمار جاليليو التابعة لكوكب المشتري من حيث الحجم (حيث إن قطره يبلغ ٥١٥٠ كيلومترًا). وقد أظهرت مركبة الفضاء «فويدجر» هذا القمر في هيئة كرة برتقالية ضبابية؛ لأنه — من بين كل الأقمار — يمتلك غلافًا جويًّا كثيفًا. ويحتوي هذا الغلاف الجوي على ٩٧٪ نيتروجين، لكن السببَ في عتامته الميثانُ، إضافة إلى مشتقاته الكيميائية الضوئية التي تحوِّل طبقة الستراتوسفير إلى دخان ضبابي معتم. ويمتلك هذا القمر قشرة ودثارًا مكونين من الجليد (أغلبه جليد مائي)، ويشغلان الثلث الخارجي من نصف قطر القمر، ويعلوان لبًّا صخريًّا. وربما

يوجد لب داخلي حديدي، وفي هذه الحالة من المفترض أن تكون قاعدة الدثار الجليدي أكثر عمقًا لتعادل متوسط الكثافة العامة. وفترة دوران تيتان حول محوره تتأثر بالرياح الموسمية؛ ما يبين لنا أن الغلاف الصخري لا بد أن يكون مفصولًا عن المحتوى الداخلي، والأرجحُ أن الحاجز الفاصل بينهما هو محيط داخلي يكون في أغلبه ماءً، أو مزيجًا من الماء والأمونيا (الذي يمكن أن يظل سائلًا في درجة حرارة أقل بشكل ملحوظ مقارنة بالماء النقي). ومعظم النماذج تعتبره طبقة «ضمن» الدثار الجليدي وليس على قمة الصخر الداخلي مباشرة.

وقد تعاملت بعثة «كاسيني» مع مشكلة التعرف على طبيعة سطح تيتان بثلاث طرق؛ فقد حصلت على صور مشوشة لكن مقبولة لسطح هذا القمر في نطاقات ضيقة من الأشعة تحت الحمراء القريبة؛ حيث يكون الدخان الضبابي أقل قتامة، واستخدمت رادار تصوير مثل مسبار «ماجلان» المرسَل لكوكب الزهرة لرؤية السطح بصرف النظر عن السحب، وحملت مسبارًا يُطلق عليه «هايجنز» التقط صورًا من أسفل السحب خلال الهبوط المظلي إلى السطح. والعمليات الجيولوجية التي تتم في سطح تيتان التي أظهرتها هذه المجموعة من طرق التصوير تُشبه إلى حد بعيد الكثيرَ من العمليات التي تحدُث على كوكب الأرض؛ فالقشرة تتكون في الأساس من جليد مائي يتسم بالصلابة الشديدة، ويشبه الصخر في سلوكه في بيئة سطح تيتان، التي تصل درجة حرارتها إلى ١٨٠ درجة تحت الصفر. واستقر المسبار «هايجنز» بالقرب من خط الاستواء على سهل رملي يتناثر عليه الحصى؛ كان أشبه بكوكب المريخ باستثناء أن الرمل والحصى كليهما كانا مكوَّنينِ من الجليد. من الوارد أن تكون الريح قد عصفت بالرمل. وتُظهر صور الرادار حقولًا شاسعة من كثبان رمل عصفت بها الريح إلى أجزاء أخرى من القمر، لكن لا بد أن يكون الحصى قد نُقل عن طريق سائل متدفق، أغلب الظن أنه ميثان CH_4 أو إيثان C_2H_6، وذلك في ضوء تركيب الغلاف الجوي للقمر ودرجة حرارة سطحه. وخلال هبوط المسبار هايجنز، التقط صورًا لقنوات تصريف متفرعة بالقرب من موقع الهبوط، ويكشف التصوير الراداري أنظمة أودية معقدة في العديد من المناطق الأخرى تبدأ في المرتفعات التي تكون فيها «قاعدة» القشرة الجليدية مكشوفة، وتصب في أحواض منخفضة تتراكم فيها الرواسب. أهم من ذلك أن المسبار عثر على بحيرات من الميثان السائل المختلط بالإيثان بالقرب من كلا القطبين (انظر الشكل رقم ٤-٥). وبعض قيعان البحيرات كانت جافة، وبعضها الآخر كانت له حواف ضحلة أو سبخية، ومن المحتمل

أنها تتنوع موسميًّا. ومن الواضح أن تيتان نشط جيولوجيًّا؛ فقد تم التعرُّف على بضع فوهات صدمية متآكلة بشدة، ويشتبه في وجود بعض مواقع «براكين جليدية»؛ حيث تثور «الماجما» الجليدية بدلًا من تدفقات الحمم البركانية الأرضية.



شكل ٤-٥: فسيفساء لصور رادارية التقطتها بعثة «كاسيني» تغطي مساحة قدرها ١١٠٠ كيلومتر بالقرب من القطب الشمالي للقمر تيتان. والمناطق الداكنة هي بحيرات يتجاوز حجم أكبرها ١٠٠ ألف كيلومتر مربع، وهي أكبر ٢٠٪ من بحيرة سوبيريور في أمريكا الشمالية. ويمكن رؤية قنوات تصريف متفرعة تغذي تلك البحيرات. وقد تم إضافة خطوط الطول، والمناطق الخاوية لم يتم تصويرها.

غير معلوم إلى أي مدًى تسهم البراكين الجليدية والعمليات التكتونية في نحت وإعادة تجديد سطح القمر تيتان، بيد أنه من الواضح أنَّ تآكُل القاعدة (وهي الجليد في هذه الحالة بالطبع) متبوعًا بنقل وترسيب الرواسب هما العاملان المؤثران الرئيسيان في هذا الشأن. والمطر الذي يسقط على القمر تيتان لا بد أن يكون محتويًا على قطيرات من الميثان الذي يتخلل السطح، كما هو الحال مع سقوط الأمطار على كوكب الأرض، ويغذي ينابيع تَملأ جداول وأنهارًا به. ومن غير المعروف على سبيل اليقين مدى قدرة الميثان على التفاعل كيميائيًّا مع «القاعدة» الجليدية، ومدى قدرته النحتية ومعدل تبخُّره مرة أخرى إلى الغلاف الجوي، والمدة التي يظل خلالها هناك قبل أن يتساقط مطرًا مرة أخرى. وكل هذه لا بد أن تكون عوامل في دورة ميثان تشبه دورة الماء على سطح كوكبنا الأرضي. ومنذ وقت طويل، كان بكوكب المريخ هطول أمطار وأنهار وبحيرات، لكن القمر تيتان هو المكان الوحيد بخلاف كوكب الأرض الذي تحدُث فيه هذه الأشياء اليوم. في يومٍ ما،

سوف نرسل مسبارًا آخر لاستكشاف القمر تيتان على نحو أكثر دقة، وربما تشتمل الرحلة حينها على منطاد ينجرف أسفل الدخان الضبابي بقابلية متنوعة للطفو؛ بحيث يستطيع أن يهبط في أماكن مثيرة للاهتمام. ومثل هذه البعثة يمكن أن تأخذ عينات من سائل بحيرة من بحيرات هذا القمر، وتحصل على صور للموجات التي تتكسر على شاطئ شديد الغرابة.

(٢-٥) ميراندا وأرييل

بالرغم من أن البراكين الجليدية الموجودة حاليًّا على القمر تيتان لا تزال موضع جدل، فلا يمكن التشكيك في البراكين الجليدية القديمة الموجودة على اثنين من الأقمار النظامية الخمسة التابعة لكوكب أورانوس، وهما أرييل وميراندا؛ حيث تكون درجة حرارة السطح ٢٠٠ درجة مئوية تحت الصفر. ويمكن رؤية تأثيراتها في صور التقطتها بعثة «فويدجر ٢» التي زارت منظومة أورانوس في يناير ١٩٨٦.

والقمر أرييل هو أكبر القمرين حجمًا؛ إذ يبلغ قطره ١١٥٨ كيلومترًا، وهو جرم كروي معقد يقطع أرضه القديمة المليئة بالفوهات العديد من التصدعات التي تحيط بكتل صخرية مرتفعة. ومعظم هذه التصدعات تشكل حدودًا لأودية ذات أرضية منبسطة من النوع الذي يعبِّر عنه المصطلح الوصفي «تشاسما». ومع ذلك، بدلًا من أن تكون أرضيات معظم هذه الأودية منخفضة، فإنها غُطيت بمادة ملساء أو — على الأقل — بشيء يبدو أملس في صور بعثة «فويدجر».

الأرجح أنه في الماضي السحيق (منذ أكثر من مليارَي سنة)، أدَّى التسخين المدي إلى تحطيم سطح القمر أرييل وانبثاق الحمم البركانية الجليدية. وقد غطَّت هذه الحمم أرضيات الأودية، ويمكن أن نراها في بعض الأماكن وقد امتدت فيما وراءها لتطمر جزئيًّا بعض الفوهات الصدمية الأكثر قِدَمًا. ونتيجة لبعد كوكب أورانوس عن الشمس، يُتوقع أن يكون الجليد المتكون عليه عبارة عن مزيج أكثر تعقيدًا من الجليد المالح، بدرجة طفيفة، الذي عُثر عليه في الأقمار التابعة لكوكب المشتري. والناتج الذي يستخلص — على الأرجح — من عملية الانصهار الجزئي هو مزيج من الماء والأمونيا بنسبة ٢:١، وهو عبارة عن مائع بدرجة حرارة ١٠٠ درجة مئوية تحت الصفر، ويمكن أن ينتج عن طريق التسخين لدرجة أقل بكثير مما هو مطلوب لانصهار جليد الماء النقي.

ويمكن أن تُرى أيضًا تدفقات حمم بركانية «متفرقة» على القمر ميراندا؛ وهو أصغر الأقمار النظامية التابعة لكوكب أورانوس (حيث يبلغ قطره ٤٧٢ كيلومترًا). ورغم صغر هذا القمر، فإنه يمتلك سطحًا متنوعًا على نحو لافت، ربما يكون أكثر تنوعًا حتى من القمر إنسيلادوس، بالرغم من أن عدد الفوهات الصدمية العلوية يشير إلى أن آخر نشاط له كان — على الأرجح — منذ مليارات السنين. ولم ترصد «فويدجر ٢» سوى نصف هذا القمر. ونصف هذه المنطقة المصورة كثيف الفوهات، لكنه مختلف في أن معظم فوهاته (الفوهات الأقدم) تبدو ملساء كما لو أن شيئًا سقط عليها من أعلى وغطَّاها، والفوهات الأحدث فقط هي التي تحتفظ بشكلها الأصلي. أما النصف الثاني من المنطقة المصورة، فيشتمل على ثلاث وحدات أرضية حادة الحافة تُعرف باسم «الأكاليل». وكل إكليل منها مختلف، لكنها جميعًا تحتوي على أرضية ذات حافة حادة أو ذات نمط منتظم، بما يشمل سمات عُرفت بأنها تدفقات حمم بركانية جليدية (الأرجح أنها حمم من الماء والأمونيا كما هو الحال على القمر أرييل)، مع وجود فوهات في حالتها الأصلية تُقابل تلك الموجودة في الأرضية الكثيفة الفوهات.

وقد استُبعدت واحدة من أولى النظريات التي تمحورت حول القمر ميراندا، والتي كانت ترى أن كل إكليل يمثل شظية ناتجة من عملية انحلال كارثي عامٍّ وإعادة تراكم. والأرجح أن الأكاليل عبارة عن مواقع لبراكين جليدية خلَّف فيها طور الاضمحلال دون غيره آثارًا مميزة تشبه التدفقات. وتغطية الفوهات الأقدم في الأرضية خلْف الأكاليل قد يُثبت حدوث ثورات بركانية ناثرةً جسيمات جليدية في الفضاء؛ ليستقر بعضها في صورة أشبه بالجليد لمنع تكرار طبوغرافية كانت موجودة من قبل. نحن لا نعلم متى ولماذا حدث هذا، ومن غير المحتمل أن نتبين الحقيقة إلى أن تقوم بعثة أخرى برحلة فضائية إلى كوكب أورانوس، وهو الأمر الذي لن يتم — على الأرجح — قبل منتصف القرن.

(٦-٢) تريتون

تريتون هو أضخم أقمار نبتون (حيث يبلغ قطره ٢٧٠٦ كيلومترات)، والجزء الخارجي منه جليدي، لكنه يكون كثيفًا بدرجة تكفي لأنْ يكون له لب صخري كبير. وعندما مرت بعثة «فويدجر ٢» بالقرب من تريتون في عام ١٩٨٩، اكتشفت أغطية قطبية من جليد

النيتروجين المتجمد (اكتشف سابقًا من كوكب الأرض بواسطة التحليل الطيفي). ومثل ثاني أكسيد الكربون في الأغطية الجليدية على كوكب المريخ، تنكمش هذه الأغطية في فصل الصيف — على الأرجح — عن طريق التصعد وليس الانصهار، وتضيف محتواها إلى الغلاف الجوي الرقيق للقمر تريتون، الذي يتكون في الأساس من النيتروجين. وجليد القاعدة الثابت الذي يشكل قشرة تريتون عبارة — على ما يبدو — عن مزيج من الميثان وثاني أكسيد الكربون والماء. وقد يحتوي هذا المزيج على الأمونيا أيضًا، وهو ما يكاد يكون غير مرئي لمنظار التحليل الطيفي.

وأفضلُ صور القمر تريتون ذاتُ درجة وضوح تقدَّر بنحو ٤٠٠ متر لكل بكسل، وهي تُظهر سطحًا معقدًا من الناحية الجيولوجية خلف الغطاء القطبي، بما يشمل تشكيلات أرضية متنوعة يمكن أن تكون قد تكوَّنت عن طريق البراكين الجليدية (انظر الشكل رقم ٤-٦). وتحدث الفوهات الصدمية في أي مكان ولكن ليس بأعداد هائلة، ومن الوارد أن يكون عمر جزء كبير من السطح أقل من مليار عام. والقمر تريتون معروف أيضًا بأن به ينابيع حارة تثور من خلال الغطاء القطبي لتقذف بجسيمات قاتمة لارتفاع يبلغ نحو ٨ كيلومترات. وتوجد أيضًا بعض السحب ذات الارتفاعات العالية التي تتكون من بلورات نيتروجين، وهي تشبه السحب الرقيقة المرتفعة الموجودة في غلافنا الجوي.

ولم ترصد بعثة «فويدجر» سوى الغطاء القطبي الجنوبي؛ لأن معظم نصف الكرة الشمالي كان في ظلام. ولفصول تريتون طبيعة خاصة؛ نظرًا لميل محور نبتون بمقدار ٢٩٫٦ درجة، ولميل مدار تريتون بمقدار ٢١ درجة. وعلاوة على ذلك، يميل المستوى المداري للقمر تريتون حول محور نبتون بحيث لا تساوي الدورة الموسمية الكاملة على تريتون الفترة المدارية لنبتون حول الشمس التي تبلغ مدتها ١٦٤ سنة، ولكن تساوي ٦٨٨ سنة، مع دورات فرعية مدتها ١٦٤ سنة. وخلال الدورة الكاملة، تتراوح زاوية العرض تحت الشمسي على تريتون بين ٥٠ درجة شمالًا و٥٠ درجة جنوبًا. وبالمصادفة، عندما حلَّقت مركبة الفضاء «فويدجر ٢» بالقرب من تريتون، كان يقترب من الصيف الجنوبي المتطرف حيث كان متعامدًا تمامًا مع الشمس عند ٥٠ درجة جنوبًا؛ ومن ثم فإن جزءًا كبيرًا من نصف الكرة الشمالي كان في ظلام، ولم يكن ممكنًا رصده. وقد أظهر الغطاء القطبي الجنوبي المضاء بالشمس علامات على انكماشه، وتم التحقق من تصعُّده إلى غاز عن طريق عمليات رصد له من كوكب الأرض، في عام ١٩٩٧، أظهرت



شكل ٤-٦: فسيفساء من صور التقطتها بعثة «فويدجر» تغطي منطقة يبلغ عرضها ٢٠٠٠ كيلومتر من القمر تريتون. جهة الجنوب في الجزء العلوي من الصورة، ويأتي ضوء الشمس من أعلى اليمين. والحافة المشقوقة للغطاء القطبي الجنوبي تتجه قطريًّا عبر الجزء العلوي من الصورة. والنتوءات الضيقة الطويلة المنحنية (الأثلام) يمكن أن تكون صدوعًا اندلعت منها الماجما البركانية الجليدية. والسهول والأحواض الملساء الموجودة في الجزء السفلي الأيسر من الصورة هي — على الأرجح — مناطق من الحمم البركانية الجليدية. والمنطقة ذات النقر الموجودة في الجزأين الأوسط والسفلي الأيمن من الصورة يُطلق عليها «منطقة الكنتالوب»؛ بسبب التشابه الشكلي بينها وبين غلاف ثمرة الكنتالوب، لكن منشأها غير معلوم.

أن الضغط الجوي كان قد تضاعف في السنوات الثماني التي مرت منذ زيارة بعثة «فويدجر» لتريتون. وأثناء ذلك، كان الغطاء القطبي الشمالي غير المرئي يتنامى على الأرجح؛ حيث تكاثف النيتروجين الجوي على السطح البارد.

الفصل الخامس

الكويكبات

لا يمكن أن يكتمل كتاب عن الكواكب دون التعرض لموضوع الكويكبات؛ لأنها أكثر الأجرام التي تصطدم بكواكب المجموعة الشمسية الداخلية (حيث تكون اصطدامات الكويكبات أكثر شيوعًا بنحو عشرة أضعاف من اصطدامات المذنبات). وبالإضافة إلى ذلك، يُصنف رسميًّا أكبر كويكب، ويدعى سيريس، بأنه كوكب قزم.

(١) الأشكال والأحجام والتركيب

سيريس هو هدف مركبة الفضاء «دون» التابعة لوكالة ناسا، وسوف تقضي هذه المركبة خمسة أشهر في الدوران حول هذا الكويكب في عام ٢٠١٥، بعد أن قضت بالفعل عامًا بدأ في يوليو ٢٠١١ في الدوران حول فيستا؛ وهو ثاني أكبر كويكب. وقد زارت مركبةُ فضاء بضعةَ كويكبات أصغر حجمًا والتقطت صورًا (انظر الشكل رقم ٥-١) تؤكد على الشكل غير المنتظم لهذه الكويكبات. تخيَّلْ ثمرة من البطاطس بها حفر، ويبلغ حجمها ما بين عشرات الأمتار وبضع مئات الكيلومترات، وسوف تتكون لديك صورة ذهنية عن الشكل المعتاد للكويكب. وتُظهِر التنويعات الدورية في درجة لمعان الكويكبات المرصودة تليسكوبيًّا أنها تستغرق — في الأغلب — بضع ساعات فقط في الدوران حول محورها. وبوجه عام، يدور الكويكب حول محوره على نحو متعامد مع طوله.

نحو كويكب واحد بين ٥٠ كويكبًا يكون له — على الأرجح — قمر تابع، ومن حسن الحظ أن الكويكب إيدا، وهو ثاني كويكب تزوره مركبة فضاء عندما مرَّت به بعثة «جاليليو» عام ١٩٩٣، تبيَّن أنه واحد من تلك الكويكبات. كان هذا هو الاكتشاف الأول المؤكد لقمر تابع لكويكب، لكن لاحقًا تم العثور على المزيد من الأقمار التابعة باستخدام تقنيات تليسكوبية متطورة، مثل تقنيات التكييف البصري للتعامل مع لمعان



شكل ٥-١: صور لكويكبات بمقاييس رسم مختلفة. الصورة العلوية: كويكب الحزام الرئيسي إيدا الذي يبلغ طوله ٥٤ كيلومترًا مع قمره الصغير داكتيل على يمينه. الصورة اليسرى السفلية: الكويكب القريب من الأرض إيروس الذي يبلغ طوله ٣٣ كيلومترًا. الصورة اليمنى السفلية: إيتوكاوا؛ وهو كويكب عابر للأرض يبلغ طوله ٠٫٥ كيلومتر. وتوجد العديد من الفوهات الصدمية المرئية على كويكبي إيدا وإيروس، لكن إيتوكاوا الأصغر كثيرًا به الكثير من الصخور الجلمودية المبعثرة.

الغلاف الجوي لكوكب الأرض. وتتراوح الأقمار التابعة للكويكبات في حجمها بين أقمار صغيرة نسبيًّا وأقمار أشبه بحجم الكويكب الرئيسي الذي تتبعه. في الواقع، يبدو أن الكويكب الذي يحمل اسم أنتيوبي يتكون من جرمين يدور كلٌّ منهما حول الآخر، ويبلغ حجمهما ١١٠ كيلومترات، ولا يفصل بين مركزيهما إلا نحو ١٧٠ كيلومترًا. وإلى الآن، يوجد كويكبان معروف أن كلًّا منهما يتبعه قمران صغيران. وبعض الأقمار التابعة للكويكبات يمكن أن تكون شظايا ناتجة من تصادم، ويمكن أن يكون البعض الآخر أجرامًا مأسورة بفعل جاذبية الكويكب الذي تتبعه. وكلتا الحالتين غير مفهومة؛ لأنه من الصعب أن ينتهي بها الحال بأن تصبح أجرامًا تدور حول كويكبات بدلًا من أن تشرد بعيدًا عنها.

قُدرت كثافة الكويكبات ما بين ١٫٢ و٣جم/سم٣. ومع ذلك، فإن النيازك الحجرية التي من الواضح أنها عبارة عن أجزاء من الكويكبات لها كثافات تبلغ نحو ٣٫٥جم/سم٣، والنيازك الحجرية الحديدية لها كثافات تقترب من ٥جم/سم٣؛ ومن ثم فإنه لا يمكن أن يكون أيٌّ من الكويكبات المقاسة جرمًا صلبًا كاملًا. وعوضًا عن ذلك، لا بد أنها عبارة عن أكوام مسامية من كسارة الحجر. وبعض هذه الكويكبات، مثل إيتوكاوا الذي زاره المسبار الياباني «هايابوسا» في عام ٢٠٠٥ (انظر الشكل رقم ٥-١)، وغيرها من الكويكبات التي حدد معالم شكلها الرادار؛ يبدو أنها عبارة عن «ثنائيات متلامسة» تتكون من كتلتين رئيسيتين متصلتين. ومع ذلك، فإن الصخور الجلمودية العديدة الموجودة على سطح الكويكب إيتوكاوا تشير إلى أن الكتلتين الرئيسيتين نفسيهما تتكونان من العديد من الأجزاء.

والكويكبات ليست ملونة بألوان قوية زاهية، لكن يمكن تصنيفها إلى عدة فئات وفقًا لِطَيفها الانعكاسي، فيوجد ثلاثة أنواع رئيسية: النوع «إس» له خصائص الصخر السليكي، ومن الواضح أنه يتكون من نفس المادة التي تتكون منها النيازك الحجرية، وهذا النوع يشكل أغلب الكويكبات بمدارات تبعد عن الشمس بمسافة تتراوح بين نحو ٢ و٢٫٦ وحدة فلكية. في حين أن النوع «سي»، وهو الأكثر شيوعًا، والذي يبعد عن الشمس مسافة تتراوح بين ٢٫٦ و٣٫٤ وحدات فلكية؛ يتميز بخصائص نيازك الكوندريتات الكربونية. أما النوع «دي»، فيتمثل في الكويكبات التي تبعد عن الشمس مسافة تزيد على ٣٫٤ وحدات فلكية تكون مظلمة في أغلبها، وحمراء اللون بعض الشيء، وقد تكون ملونة ببقايا سطح قطراني تشكل من مادة كربونية خلال التعرُّض الطويل للإشعاع الشمسي (التجوية الفضائية). وهذه المواد القطرانية عادة ما يشار إليها باسم «الثولينات»، وهو مصطلح اشتقَّه عالم الفلك الأمريكي كارل ساجان (١٩٣٤–١٩٩٦) من كلمة إغريقية قديمة تعني بالعربية «الوحل».

أما النوع «إم»، فهو مبعثر في أماكن متفرقة ويكون — على ما يبدو — معدنيًّا في الأساس، ومن الواضح أنه يرتبط بالمذنبات الحديدية. وبالنسبة للكويكبات من النوع «في»، فعددها قليل، ويوجد بازلت على سطحها، ومن أشهرها كويكب فيستا الذي أخذ نوع الكويكبات اسمه من أول حرف فيه. هذه الكويكبات أو جرمها الأصلي المفتت حاليًّا ربما تكون درجة حرارتها قد ارتفعت ذات مرة بما يكفي لحدوث انصهار داخلي أو ثورات بركانية.

(٢) مدارات الكويكبات

تمتلك معظمُ الكويكبات المعروفة (التي تعادل نحو ٤٪ من كتلة القمر الأرضي) مداراتٍ تقع بين مدارَي كوكبَي المريخ والمشتري في النطاق الذي يُعرف باسم «حزام الكويكبات». وقد تم توثيق أكثر من ثلاثة آلاف كويكب من كويكبات الحزام الرئيسي. ويتمثل أكثر من نصف الكتلة الإجمالية لهذه الكويكبات في أربعة كويكبات هي الأضخم، وتشمل سيريس وفيستا وبالاس وهايجيا، التي تبلغ أقطارها على الترتيب ٩٥٠ و٥٣٠ و٥٤٠ و٤٣٠ كيلومترًا (فيستا أعلى كثافة من بالاس؛ ومن ثم فإنه أعلى كتلة بالرغم من أنه أصغر قليلًا). ويتراوح حجم الأجرام غير المكتشفة ما بين كتل متفرقة من الصخر وجسيمات غبارية. ومع ذلك، فحزام الكويكبات في معظمه عبارة عن فضاء فارغ، ويجب ألا تعتَقِد أنه يعجُّ بالصخور المتصادمة. لم تُصَبْ أيٌّ من المسابير الفضائية التي أُرسلت إلى حزام الكويكبات بسوء، بل أيضًا تم توجيهها بحرص لتقترب بالقدر الكافي من أي كويكب من أجل دراسته أثناء مروره.

ولجاذبية كوكب المشتري تأثير كبير على مدارات الكويكبات في الحزام الرئيسي، وأهم جانب من هذا التأثير أنها تمنع الكويكبات من الاستقرار في مدارات تكون فتراتها المدارية في حالة رنين مداري مع الفترة المدارية لكوكب المشتري، فيكاد لا يوجد كويكب تكون النسبة بين فترته المدارية والفترة المدارية لكوكب المشتري هي، ببساطة: ١:٤ أو ١:٣ أو ٢:٥ أو ١:٢. هذا يتوافق مع متوسطات المسافة بين الكويكبات والشمس (أنصاف المحاور الرئيسية المدارية) التي تبلغ ٢٫٠٦ و٢٫٥٠ و٢٫٨٢ و٣٫٢٨ وحدات فلكية على الترتيب، وهو ما يُعرف باسم فجوات كيركوود، نسبةً إلى دانيال كيركوود؛ وهو عالم فلك أمريكي اكتشفها وأوضحها في عام ١٨٨٦. وليست جميع حالات الرنين المداري متقلبة فيما يتعلق بمدارات الكويكبات. وفي واقع الأمر، توجد عائلة صغيرة من الكويكبات التي تمثِّل فتراتُها المدارية ثلثَي الفترة المدارية لكوكب المشتري (أيْ بِرَنِينٍ مداريٍّ نسبته ٢:٣).

يوجد المزيد من الكويكبات التي لها «نفس» الفترة المدارية لكوكب المشتري، فربما يوجد أكثر من مليون كويكب من هذه النوعية يكون حجمها أكبر من كيلومتر واحد بكتلة مشتركة تبلغ نحو خُمس كتلة الحزام الرئيسي. وهي لا تتواجد إلَّا بالقُرب من مواقع توجد على بعد ٦٠ درجة أمام أو خلف مدار كوكب المشتري. وهذه المواقع تمثِّل أماكن خاصة تسمح فيها قوة الجاذبية المشتركة من الشمس وكوكب المشتري للأجرام الصغيرة

بالدوران على نحو مستقر، وتُعرف باسم «نقاط لاجرانج» الأمامية أو الخلفية. وجرى العرف على أن تحمل الكويكبات في مثل هذه المدارات أسماء أبطال من حرب طروادة (أسماء إغريقية لتلك التي أمام مدار المشتري بمقدار ٦٠ درجة، وأسماء طروادية لتلك التي خلْفه بمقدار ٦٠ درجة)، لكن يُطلَق عليها مجتمعةً «كويكبات طروادة».

(٣) الكويكبات والاصطدام بكوكب الأرض

يوجد بضعة كويكبات من نوعية كويكبات طروادة بالقرب من كوكب المريخ، لكن كوكب الأرض ليس له رفاق «طرواديون». ومع ذلك، توجد كويكبات تعبر مداراتُها كوكبَنا وتُعرف باسم الكويكبات العابرة للأرض. إذا كنت ممن تشغلهم التصادمات، فربما يكون هذا الأمر مقلقًا بالنسبة لك، لكن مدارات الكويكبات غالبًا ما تكون مائلة نحو مدار الشمس؛ لذا فإنها تمرُّ على نحو شبه دائم إما من «فوق» وإما من «أسفل» كوكب الأرض عند عبورها مداره. مجموعة فرعية فقط من الكويكبات العابرة للأرض هي ما تُعد «كويكبات كامنة المخاطر»، وهي تلك التي تستطيع العبور في نطاق ٠٫٠٥ وحدة فلكية من كوكب الأرض (وهي مسافة تكون قريبة بما يكفي لأن تؤدي الاضطرابات الحادثة بفعل أجرام أخرى متنوعة إلى حدوث تصادم)، والتي تكون أقطارها أكبر من ١٥٠ مترًا (وهو الحجم الذي يكفي لأن تمرَّ عبر الغلاف الجوي للأرض بسرعة ثابتة). بحلول عام ٢٠٠٩، كان قد تم توثيق نحو ١١٠٠ كويكب من الكويكبات الكامنة المخاطر، إضافة إلى أقل من ١٠٠ مذنب من «المذنبات الكامنة المخاطر».

ووفقًا لتقديرات الفلكيين، فإن أشد اقتراب لكويكب كامن المخاطر من كوكب الأرض سوف يكون من جانب كويكب أبوفيس (الذي يبلغ طوله ٣٥٠ مترًا)، وسيحدث هذا في يوم الجمعة الموافق ١٣ أبريل ٢٠٢٩؛ فبعد اكتشاف هذا الكويكب في عام ٢٠٠٤، لم يكن مداره معروفًا على نحو جيد، وكان هناك احتمال (يقدر بنحو ٢٫٧٪) لحدوث تصادم، لكن أظهرت فيما بعدُ مجموعةٌ من عمليات الرصد، أُجريتْ على مدًى زمني أطول، أن هذا الكويكب سوف يمر بأمان على ارتفاع ٣٠ ألف كيلومتر فوق سطح الأرض. وسوف يعود مرة أخرى في ١٣ أبريل ٢٠٣٦. ونظرًا لأننا لا نعرف «بالضبط» إلى أي مدًى سيكون قريبًا عند عبوره عام ٢٠٢٩، فإننا لا نعرف بالضبط إلى أي مدًى سوف يتأثر جزء كبير من مساره بجاذبية الأرض خلال هذا اللقاء. ومع ذلك، فإن احتمالات حدوث تصادم في عام ٢٠٣٦ ضئيلة للغاية.

والكويكب الذي يخترق الغلاف الجوي لكوكب الأرض بسرعة ثابتة يمثل خطورة كبيرة جدًّا. وعند اصطدام الكويكب بالمحيط يمكن أن يؤدي إلى حدوث تسونامي، وإذا اصطدم بالأرض فسيؤدي إلى تشكيل فوهة حجمها يزيد على حجمه ويدمر المنطقة المحيطة به. لقد اكتُشفت فوهة أُطلق عليها ألتانين قطرها ١٣٠ كيلومترًا، وعمرها ٢٫٢ مليون سنة، وذلك تحت قاع بحر بلنجهاوزن في أقصى جنوب المحيط الهادئ. ومن الواضح أن هذه الفوهة تَشكَّلَت بفعل كويكب يبلغ قطره عدة كيلومترات. هذا الكويكب لم يبطئ من حركته المحيطُ، فضلًا عن الغلاف الجوي قبل أن يضرب قاع البحر. ووفقًا للنماذج الحاسوبية، يمكن أن يكون قد أدى التسونامي الناتج إلى تدمير الساحل بمقدار ٣٠٠ متر فوق مستوى سطح البحر في جنوب تشيلي، و٦٠ مترًا فوق مستوى سطح البحر في نيوزيلندا، بل إن مقدار الماء والغبار اللذين صعدا إلى الغلاف الجوي ربما أدَّيا إلى تغير في المناخ؛ الأمر الذي اضطر أسلافَنا من سلالة الإنسان المنتصب إلى الهجرة خارج قارة أفريقيا في هذا التوقيت تقريبًا. وأحدثُ تصادمٍ بين كوكب الأرض والكويكب «القاتل للديناصورات»، الذي يبلغ قطره ١٠ كيلومترات، حدثَ منذ ٦٥ مليون عام؛ ما أدى إلى تشكيل فوهة «تشيكسولوب» المطمورة الآن تحت الرواسب في شبه جزيرة يوكاتان بالمكسيك. أدى هذا التصادم إلى حدوث اضطراب بيئي عالمي يُعتقد — على نطاق واسع — أنه سبب حدوث «انقراض جماعي»، عندما استأصل نحو ٧٥٪ من أنواع الكائنات على سطح الأرض.

لحسن الحظ أن كوارث ضخمة كهذه نادرة الحدوث، لكن الإحصائيات تشير إلى أن اصطدامات الكويكبات تُعَد جنبًا إلى جنب مع الثورات البركانية، والزلازل، والتطرف الشديد في الطقس، من بين الأسباب المحتملة للوفاة؛ فالكويكب الذي يبلغ قطره كيلومترًا واحدًا، والذي لديه القدرة على تدمير سواحل على بُعد ٣ آلاف كيلومتر من نقطة الاصطدام؛ يضرب المحيط كل نحو ٢٠٠ ألف سنة في المتوسط، في حين يُتوقع اصطدام كويكب قطره ٢٠٠ متر، وبخطرٍ أقلَّ بكثيرٍ، كل نحو ١٠ آلاف سنة.

ولتصنيف الخطر الذي يشكله كل كويكب كامن المخاطر، يستخدم علماء الفلك نظامًا عدديًّا يُطلق عليه «مقياس تورينو» (الذي اتُّفق عليه في اجتماع عُقد في مدينة تورينو، وهذا هو سر إطلاق هذا الاسم عليه). هذا المقياس يجمع بين الطاقة التي من المفترض أنها تَنتج عن التصادم واحتمالات حدوث تصادم، مع تمثيل ذلك برقم واحد يتراوح بين صفر و١٠؛ حيث يمثِّل الصفر احتمالًا يكاد يكون منعدمًا لحدوث

تصادم و/أو أنَّ الكويكب صغير جدًّا إلى الحد الذي لا يُمكِّنه من اختراق الغلاف الجوي. أما الرقم ١٠، فيعبِّر عن اصطدام أكيد من قِبَل كويكبٍ بقوةِ الكويكبِ «القاتلِ للديناصورات»؛ ما يتسبب في كارثة عالمية. ومعظم الكويكبات الكامنة المخاطر التي يزيد قطرها على ١٥٠ مترًا تأخذ الترقيم صفرًا أو ١ عند اكتشافها، والكويكبات التي تأخذ الترقيم ١ عادةً ما يتم إنزالها إلى الترتيب صفر عندما يتم تحديد مدارها على نحوٍ أكثر دقة. والكويكب أبوفيس كان له لفترة من الوقت ترقيم مرتفع على مقياس تورينو؛ وهو الرقم ٤ («الاقتراب الشديد» الذي استحوذ على اهتمام علماء الفلك؛ احتمال ١٪ أو أكثر لحدوث تصادم لديه القدرةُ على تدمير منطقة بالكامل)، لكن ترقيمه حسب المقياس تراجع إلى صفر في عام ٢٠٠٦.

اضطلع تجمُّع شبه رسمي يضم عددًا من المراصد ويُطلق عليه «سبيسجارد» بمهمة تحديد مواقع الكويكبات الكامنة المخاطر وتصنيفها. وهذا أمر مهم؛ لأنه على العكس من معظم أنواع الكوارث الطبيعية التي لا نستطيع أن نفعل حيالها شيئًا سوى تخفيف آثارها، قد يكون من الممكن منع حدوث اصطدام لكويكب كامن المخاطر بكوكبنا الأرضي. ولتحقيق هذا، فإنه من الضروري تغيير سرعة الكويكب الكامن المخاطر أو اتجاه سيره. وكلما تم ذلك في وقت أكثر تبكيرًا، كان التغيير المطلوب أصغر. ثمة طرق عديدة للقيام بهذا، وهي تتراوح بين طريقة إجبارية تتمثل في تركيب محرك صاروخي في الكويكب، وحيلة أكثر ذكاءً تتمثل في تغليف جانب من الكويكب بمادة عاكسة؛ ليقوم ضغط الإشعاع الشمسي بالمهمة. استخدام قنبلة نووية لتدمير كويكب كامن المخاطر قبل وصوله إلى كوكب الأرض ليس فكرة ذكية؛ لأنه إذا لم تضمن أن تكون جميع الشظايا صغيرة جدًّا لدرجة تمنعها من اختراق الغلاف الجوي، فإنك قد تجعل المشكلة أكثر سوءًا عن طريق التسبب في اصطدامات متعددة.

(٤) استخراج المعادن من الكويكبات

ثمة جانب إيجابي في الكويكبات يتمثل في أنها يمكن أن تكون مصادر قيِّمة للمواد الخام؛ فكويكب من النوع «إم» — يبلغ قطره كيلومترًا واحدًا — يحتوي على نيكل وحديد يفوق الاستهلاك العالمي السنوي لهذين المعدنين، وأبرز مثال على ذلك: الكويكب «سايك» الضخم الذي يحتوي على كميات من هذين المعدنين يمكن أن يغطي الاستهلاك لملايين السنين. كما تحتوي الكويكبات، لا سيما تلك التي من النوع «إم»، على معادن ثمينة مثل البلاتينيوم.

تكلفة بدء التعدين في أول كويكب يمكن أن تكون باهظة للغاية، لكن العوائد المحتملة ستكون ضخمة أيضًا. ويبقى أن نتأكد مما إذا كانت القيمة الأساسية للكويكبات تتمثل في كونها مصدرًا للمواد الخام لكوكبنا الأرضي أم للصناعات التي تتم في الفضاء؛ فبعض الأجرام الموجودة بالقرب من كوكب الأرض هي — على الأرجح — بقايا مذنبات تحمل بعضًا من الجليد المائي المتبقي أسفل أسطحها الغبارية، الذي قد يمكن استخدامه كمادة دافعة وكمادة واقية من الإشعاع، إضافة إلى إمكانية استخدامه في الشرب.

(٥) الأسماء والأسماء المؤقتة

بحلول عام ١٨٩١، كان قد تم اكتشاف ٣٣٢ كويكبًا عن طريق الرؤية، لكن التصوير الفوتوغرافي زاد هذا العدد إلى ٤٦٤ خلال ١٠ سنوات. يوجد الآن أكثر من ١٠٠ ألف جرم معروف من جميع الأنواع، وكلٌّ منها يحتاج إلى تعريفه بطريقةٍ ما. ويُشْرف الاتحاد الفلكي الدولي على نظام تسمية مؤقت للاكتشافات الجديدة. والاسم وفقًا لهذا النظام يشتمل على سنة الاكتشاف، إضافة إلى رمز مكون من حرفين وأرقام سفلية تشير إلى التاريخ والترتيب المتسلسل للاكتشاف. يحدد الحرف الأول (من A إلى Y باستثناء الحرف I) أيَّ نصفٍ من الشهر تمَّ فيه الاكتشاف (الحرف A يشير إلى ١–١٥ يناير، والحرف B يشير إلى ١٦–٣١ يناير، وهكذا وصولًا إلى الحرف Y الذي يشير إلى ١٦–٣١ ديسمبر)، أما الحرف الثاني (من A إلى Z باستثناء الحرف I؛ ومن ثم يكون هناك ٢٥ خيارًا) فيعطي لكل اكتشاف ترتيبًا متسلسلًا، ويتيح الرقم السفلي تكرار تتابع الـ ٢٥ أكبر عدد ممكن من المرات. إذن 2011 BA يعني الجرم الأول المكتشف في الفترة من ١٦–٣١ يناير ٢٠١١؛ و2011 BB يعني الجرم الثاني، و$2011\ BA_1$ يعني الجرم السادس والعشرين وهكذا. وعندما يتحدد جيدًا مدار جرم معين (الأمر الذي قد يستغرق سنوات عديدة)، يمكن أن يُعطى اسمًا دائمًا يحل محل الاسم المؤقت. على سبيل المثال، كان الكويكب أبوفيس يحمل في الأصل اسمًا مؤقتًا هو $2004\ MN_4$ (للدلالة على أنه الاكتشاف رقم ١١٣ خلال الفترة من ١٦–٣٠ يونيو ٢٠٠٤).

وميزة اقتراح اسم دائم تكون من نصيب الفريق المكتشِف، بالرغم من أن بعض عمليات المسح المُؤَتْمَتَة تكشف عن الكثير من الأجرام الجديدة التي يقترح أسماءها المسئولون عن تلك العمليات. والاسم الدائم هو اسم مسبوق برقم متسلسل، ويضاف الرقم مع إضافة كل اسم جديد؛ لذا نحن رسميًّا لدينا (١) سيريس و(٤) فيستا

و(٩٩٩٤٢) أبوفيس وهكذا. والأسماء المأخوذة من الأساطير القديمة المتاحة قليلة جدًّا بحيث لا تكفي كل هذه الأجرام، وتقريبًا كل شيء متاح في الأسماء بشرط ألَّا يكون الاسم مسيئًا أو مرتبطًا بنشاط سياسي أو عسكري حديث. أعرف العديد من علماء الفلك الذين أُطلقت أسماؤهم على كويكبات (من قِبل زملائهم؛ فليس بمقدورك أن تطلق اسمك من تلقاء نفسك على كويكب)، ويوجد كويكب يُطلق عليه اسم (٥٤٦٠) تسيناتاي، الذي يعني «الصخر الطائر» بلغة النافاهو. والكويكب الوحيد الذي شاركت في تسميته هو (٥٧٤٢٤) كايلونوكتو؛ حيث أُطلق عليه هذا الاسم عام ٢٠٠٧ إحياءً للعيد الخمسين للبرنامج التليفزيوني «ذا سكاي آت نايت»، الذي استمرت إذاعته لوقت طويل على شبكة الـ بي بي سي، والذي يسمى هكذا في اللاتينية. اخترنا هذا الاسم من قائمة أسماء مقترحة؛ لأن رقمه يعكس التاريخ الذي بُثَّ فيه البرنامج للمرة الأولى، وكان ذلك في ٢٤ أبريل ١٩٥٧ (٢٤/٤/٥٧).

الفصل السادس

الأجرام الوراء نبتونية

يتواجد عدد قليل نسبيًّا من الكويكبات المعروفة باسم «القنطوريات» بين كوكبَي المشتري ونبتون، وبعض هذه الكويكبات مظلم وأحمر اللون مثل كويكبات النوع «دي» القطرانية (المغطاة بالثولينات)، لكن بعضها الآخر أكثر زرقة؛ ما يوحي بأن جزءًا كبيرًا من أسطحها يمكن أن يكون عبارة عن جليد مكشوف حديثًا. ولأن مداراتها تَعْبر الكواكب العملاقة أو تقترب منها، فإنها لا تكون ثابتة ولا تبقى على حالها أكثر من نحو عشرة ملايين سنة. الأرجح أن القنطوريات أجرام وراء نبتونية بُعثرت باتجاه الداخل، ربما نتيجة لاقترابها الشديد من كوكب نبتون، وربما يؤدي المزيد من التفاعلات بينها وبين الكواكب العملاقة إلى دفعها نحو الداخل إلى أن تصبح مذنبات دورية تقضي فترة الحضيض في قلب المجموعة الشمسية؛ لتزداد سخونة بفعل حرارة الشمس، ولتفقد أجزاءها المتطايرة في ذيول رائعة تُرى أحيانًا.

اكتُشفت ستة أجرام طروادية بالقرب من نقطة لاجرانج الأمامية لكوكب نبتون، وتوحي النقاشات المستمرة بأن ثمة أعدادًا ضخمة بانتظار مَن يكتشفها (في كلتا نقطتَي لاجرانج)، وبأن عدد الأجرام الطروادية النبتونية يمكن أن يكون عشرات أضعاف تلك الخاصة بكوكب المشتري.

ووراء نبتون، نصل إلى حزام كايبر وجميع الأجرام الوراء نبتونية الأخرى. وإحدى عائلات أجرام حزام كايبر تدور في رنين مداري مع نبتون نسبته ٢:٣. وأفراد هذه الفئة، التي تشمل بلوتو، تُعرف مجازًا باسم «البلتينوات»، ويجب عدم الخلط بينها وبين «البلوتيات»؛ وهي المصطلح الرسمي الذي وضعه الاتحاد الفلكي الدولي للتعبير عن أي جرم وراء نبتوني كبير بما يكفي لأن يتم تصنيفه بأنه كوكب قزم. ويمكن أن تكون البلوتيات بلتينوات أو أجرام حزام كايبر الكلاسيكية (التي تفتقر إلى رنين مداري

مع نبتون)، أو أجرام القرص المبعثر وراء الحزام الرئيسي. وتُعرف أجرام حزام كايبر الكلاسيكية باسم آخر هو «الكيوبيوانات» QB_1-os؛ لأن أول جرم تابع لحزام كايبر تم اكتشافه بعد بلوتو حمل الاسم المؤقت QB_1 1992.

(١) بلوتو وشارون

معرفتنا بخواص معظم الأجرام الوراء نبتونية ليست جيدة. ومع ذلك، فإن كوكب بلوتو وقمره شارون كبيران وقريبان بما يكفي لخضوعهما للدراسة التليسكوبية على مدار عدة عقود. من خلال التحليل الطيفي، اكتُشف النيتروجين والميثان وثاني أكسيد الكربون في حالة تجمد على كوكب بلوتو، وتُظهِر أكثرُ الصورِ التليسكوبية وضوحًا بقعًا داكنة يُرجح أن تكون بقايا غنية بالثولينات. وتوحي كثافة بلوتو بأنه لا بد أن الصخر يمثل نحو ٧٠٪ من كتلته الإجمالية، والأرجح أن لبه صخري (يُرجح أنه لب داخلي غني بالحديد) الذي يعلوه دثار يتكون في معظمه من جليد مائي تعلوه قشرة غنية بالمواد الأكثر تطايرًا.

وقرب الحضيض (الذي حدث مؤخرًا في عام ١٩٨٩)، يمتلك بلوتو غلافًا جويًّا غنيًّا بالنيتروجين، وربما يكون هذا الغلاف أكثر كثافة من الغلاف الجوي للقمر تريتون. ولأن جاذبية كوكب بلوتو ضعيفة جدًّا، فيمكن أن يمتد هيكل تخيلي يحيط بـ ٩٩٪ من غلافه الجوي لنحو ٣٠٠ كيلومتر فوق السطح، في حين أن الارتفاع المقابل في حالة كوكبنا الأرضي لا يتعدى ٤٠ كيلومترًا. ومن المتوقع أن جزءًا كبيرًا من الغلاف الجوي لكوكب بلوتو سيتكثف على السطح، مع زيادة المسافة بينه وبين الشمس من ٤٫٥ مليارات كيلومتر في الحضيض إلى ٧٫٤ مليارات كيلومتر في الأوج في عام ٢١١٣. من المؤسف أن تفوتنا فرصة دراسة كوكب بلوتو من موضع أقرب خلال الحضيض. سوف تنطلق بعثة «نيو هورايزونز»، التابعة لوكالة ناسا، في رحلة تمر خلالها بكوكب بلوتو في عام ٢٠١٥، وبحلول هذا الوقت ربما يكون قد تكثف جزء كبير من الغلاف الجوي للكوكب وأخفى السطح «الدائم» أسفل غطاء موسمي من الجليد النيتروجيني.

وفترة دوران كوكب بلوتو حول محوره التي تبلغ ٦٫٤ أيام هي نفس الفترة المدارية لأكبر أقماره، وهو شارون، الذي يدور بالتزامن معه. وهذه العلاقة ناتجة عن نوبات مد قوية، وهي تعني أن كوكب بلوتو وشارون يواجه كلٌّ منهما الآخر بنفس الوجه دائمًا.

وكوكب بلوتو أكثر توافقًا في الحجم والكتلة مع شارون من توافق أي كوكب آخر أو كوكب قزم مع أكبر أقماره التابعة؛ فكتلة شارون تبلغ نحو ١٢٪ من كتلة كوكب بلوتو،

وهو يدور حول كوكب بلوتو على مسافة لا تتجاوز نحو ١٧ ضعفًا من نصف قطر بلوتو قياسًا من مركز بلوتو. وللمقارنة، كتلة القمر الأرضي لا تتجاوز ١٫٢٪ من كتلة كوكب الأرض، ونصف قطر مداره يبلغ ٦٠ ضعفًا من نصف قطر كوكب الأرض. ويفسر قرب شارون من كوكب بلوتو السبب وراء عدم اكتشافه حتى عام ١٩٧٨. والقمران الأصغر حجمًا التابعان لكوكب بلوتو، وهما نيكس وهيدرا، تم اكتشافهما في عام ٢٠٠٥. وهذان القمران يدوران حول بلوتو في المستوى المداري للكوكب في رنين مداري يقترب من ٤:١ و٦:١ مع القمر شارون.

وعند رصد شارون من سطح كوكب بلوتو، يبدو عرضه أكبر من عرض القمر الأرضي عند رصده من كوكب الأرض بثماني مرات. ونظرًا لأن كتلتيهما النسبية متشابهة جدًّا، فإن مركز كتلتيهما المشترك (أي محور الثقل) لا يقع داخل بلوتو، بل عند نقطة في الفضاء تقع بين الجرمين. وبالرغم من أن الكويكبات الثنائية مثل (٩٠) أنتيوبي وأجرام حزام كايبر الثنائية مثل $2001\ QW_{332}$ (ثنائي بقطر ٢٠٠ كيلومتر) معروفة، فإن بلوتو–شارون هما أكثر ثنائي متوافق بين الأجرام الكبيرة بما يكفي لاعتبارها كواكب أو أقزام كواكب.

وأغلب سطح القمر شارون مكون من الجليد المائي مع كميات ضئيلة من الأمونيا. وكثافة شارون أقل من كثافة بلوتو، لكنها تظل كافية لأن تشكل لبًّا صخريًّا لا بأس به. وربما يتضح أن شارون قمر قليل النشاط نسبيًّا وكثيف الفوهات في حين قد يُبْهِرنا جميعًا بلوتو بكونه نشطًا من الناحية الجيولوجية، كما يوحي بذلك التنوُّعُ في مواد سطحه.

من جهة أخرى، ربما يوجد سبب وراء كون شارون أكثر نشاطًا من بلوتو الأكبر حجمًا منه. يرجع ذلك إلى ميل محور بلوتو بمقدار ١١٩٫٦ درجة (كون هذا الميل أكبر من ٩٠ درجة معناه أن دوران الكوكب حول محوره يكون عكسيًّا). يقع مدار شارون بالضبط في المستوى الاستوائي لكوكب بلوتو؛ ومن ثم فهو يشاركه الميل المرتفع فيما يتعلق بمدارهما المشترك حول الشمس. وقوى الشد المدي المتنافسة التي تمارسها الشمس وبلوتو على القمر شارون من الوارد أن تكون قوية بالقدر الذي يكفي لأن تتسبب في حدوث انصهار في مكانٍ ما من الدثار الجليدي للقمر شارون. وإذا كان الوضع كذلك، فإننا نواجه احتمالًا مثيرًا بأن يكون سطح شارون مشابهًا لسطح القمر أوروبا، بل ويحتمل أن يكون تحته محيط قد يشتمل على مظاهر حياة. وأفضل معلومات لدينا حتى الآن مصدرها الأطياف تحت الحمراء للقمر شارون، التي تم الحصول عليها

عام ٢٠٠٧، والتي عثرت على جليد مائي على سطح شارون لا يزال في شكله البلوري الأصلي مقارَنةً بالحالة غير المتبلورة دون المجهرية للجليد، الذي تَعرَّض للأشعة الشمسية فوق البنفسجية وقصف الأشعة الكونية لأكثر من بضع عشرات آلاف السنين. وأبسط تفسير لهذا هو الينابيع الحارة التي تُطلِق جليدًا حديثًا من الداخل، والتي تشبه الأعمدة المائية الحرارية على القمر إنسيلادوس.

(٢) بقية الأجرام الوراء نبتونية

يتضمن الجدول رقم ٦-١ قائمة تضم كوكب بلوتو وأكبر عشرة أجرام أخرى وراء نبتونية، وذلك في وقت تأليف هذا الكتاب. ومن بين هذه، يُنظر رسميًّا إلى إريس وميكميك وهاوميا باعتبارها كواكب قزمة. وهاوميا جرم مسطح إما بسبب سرعة دورانه حول محوره (أقل من ٤ ساعات) وإما نتيجة تصادم. وهذه أجرام كلاسيكية تتبع حزام كايبر باستثناء إريس و2007 OR_{10} (أجرام القرص المبعثر)، و2002 TC_{302} (رنين مداري مع نبتون نسبته ٥:٢)، وإكسيون (من البلتينوات)، وسِدنا (وهو طريق غريب وراء القرص المبعثر في مدار على هيئة قَطْع ناقص بأوج عند ٩٧٥ وحدة فلكية).

وبخلاف بلوتو، أحجام هذه الأجرام ليست معروفة جيدًا (حتى بالنسبة لتلك التي ورد رقم تقريبي لها في الجدول)، وأبعادها عبارة عن تقديرات تقوم على افتراضات تتعلق بوضاءتها (أي نسبة ضوء الشمس التي تعكسها عند سقوطه عليها)؛ فإذا كانت أقل انعكاسية مما هو مفترض، فلا بد أن تكون أكبر حجمًا، لكن إذا كانت أكثر انعكاسية، فلا بد أن تكون أصغر حجمًا. ويمكن أن تتحسن تقديرات الحجم عن طريق قياس الإشعاع الحراري من أسطحها، لكنها تكون باردة جدًّا (٢٣٠ درجة مئوية تحت الصفر أو أقل) لدرجة أنه لا يمكن إجراء تلك التقديرات إلا باستخدام تليسكوبات في الفضاء أعلى الغلاف الجوي لكوكب الأرض. ونظرًا لحالة عدم التيقن هذه، من غير المحتمل أن تظل جميع هذه الأجرام ضمن قائمة «العشرة الأهم والأكبر» مستقبلًا.

تتدرج الأجرام الوراء نبتونية في لونها من الأحمر (الأرجح أن يكون مصدره ثولينات منتشرة عبر أسطحها) إلى رمادي مُزْرَقٍّ (مصدره جليد مكشوف أو كربون غير متبلور). وهاوميا هو أحد الأجرام الرمادية المُزْرَقَّة، وتشير كتلته (المشتقة من مدارات أقماره) إلى أن كثافته أكبر من كثافة بلوتو؛ لذا لا بد أن يكون به محتوًى عالٍ نسبيًّا من شيء آخر غير الجليد. وعلى سطح كواور، اكتُشف الجليد البلوري وهيدرات الأمونيا عن طريق

جدول ٦-١: أكبر الأجرام الوراء نبتونية.

الاسم	القطر (بالكيلومترات)	متوسط بُعده عن الشمس (بالوحدات الفلكية)	الفترة المدارية (بالسنوات)	الأقمار المعروفة وقطرها
إريس	٢٤٠٠	٦٧,٧	٥٥٧	ديسنوميا (أقل من ٢٥٠كم)
بلوتو	٢٣٠٦	٣٩,٤	٢٤٨	شارون (١٢٠٥كم)، نيكس (١٤٠كم)، هيدرا (١٧٠كم)
ميكميك	١٣٠٠–١٩٠٠	٤٥,٨	٣٠٩,٩	—
هاوميا	١٤٠٠	٤٣,١	٢٨٣,٢	هاياكا (٣١٠كم)، ناماكا (١٧٠كم)
سِدنا	١٤٠٠	٥٢٥,٩	١٢,٠٥٩	—
2007 OR_{10}	٩٠٠–١٤٠٠	٦٧,٣	٥٥٢,٥	—
2002 TC_{302}	٨٥٠–١٤٥٠	٥٥,٢	٤١٠,٦	—
كواور	١٠٠٠	٤٣,٦	٢٨٨	وايوت (١٠٠كم)
أوركس	٩٥٠	٣٩,٢	٢٤٥,٣	فانث (٢٥٠كم)
فارونا	٥٠٠–١٠٠٠	٤٣,١	٢٨٣,٢	—
إكسيون	٦٥٠–٨٢٠	٣٩,٧	٢٤٨,٩	—

التحليل الطيفي؛ ما يوحي بتجدد السطح حديثًا (باستخدام حجج مشابهة لتلك المُقدَّمة بشأن شارون). هذا يمكن أن يتطلب إما نشاطًا جيولوجيًّا، وإما اصطدامًا كبيرًا لتوليد مقذوفات يتسع نطاقها بما يكفي للهيمنة على الطيف.

إن نسبة تتراوح بين ٢٪ و٣٪ من الأجرام الوراء نبتونية هي التي يُعرف أن لها أقمارًا تابعة، وهو ما يشبه وفرة الكويكبات التي لها أقمار تابعة، والنسبة تكون أعلى بين الأجرام الوراء نبتونية الأكبر حجمًا، وهي تطرح تحديات أمام محاولات تفسير مَنْشَئِها.

إذا أَتَمَّتْ بعثةُ «نيو هورايزونز» الفضائية، التابعة لوكالة ناسا، مهمتَها في المرور بالقرب من بلوتو وشارون عام ٢٠١٥، فسوف يتم توجيهها إلى الأمام نحو جرم وراء نبتوني أكثر بعدًا. لم يتحدد الهدف بعدُ، لكن سيكون وضعًا مثاليًّا إذا ما عثرت البعثة على جرم بلون رمادي مُزْرَقٍّ لمقارنته بطبيعة كوكب بلوتو المائلة للحمرة.

(٣) هل يوجد كوكب وراء نبتون؟

يتفق معظم علماء الفلك على أننا قد اكتشفنا جميع الأجرام الكبيرة التي تنتمي للمجموعة الشمسية؛ فبالتأكيد ليس هناك شيء بحجم الكواكب لم نكتشفه في حزام كايبر، فلو كان هذا الجرم موجودًا، لَمَا استقر حزام كايبر. ومع ذلك، يبقى احتمالان لوجود كوكب أبعد من نبتون (يشاع الإشارة إليه باسم «الكوكب إكس») لم يتم استكشافهما بعدُ: يتمثل الاحتمال الأول في وجود جرم بنفس كتلة كوكب الأرض في مدار مائل لاتراكزي يبعد عن الشمس بمسافة تتراوح بين ٨٠ و١٧٠ وحدة فلكية. ولعل وجود جرم كبير كهذا (ربما أُبعد أكثر عن الشمس بفعل اقتراب شديد من كوكب نبتون) يفسر ما رُصد من انخفاض مفاجئ في عدد الأجرام التي تتبع حزام كايبر فيما وراء ٤٨ وحدة فلكية، والذي يُعرف باسم «منحدر كايبر»، كما أنه قد يفسر حالة التبعثر الشديد الذي دَلَّت عليه أجرام مثل سِدنا.

ويأتي الاحتمال الثاني من الاعتقاد بأن المذنبات غير الدورية تأتي — في أغلب الظن — من منطقة معينة في السماء وليس من اتجاهات عشوائية. وقد افتُرض أن هذه المذنبات زحزحت من سحابة أورط عن طريق جرم بنفس كتلة كوكب المشتري يبعد عن الشمس مسافة تقدَّر بنحو ٣٢ ألف وحدة فلكية. اكتشاف هذا الأمر عن طريق التليسكوب أمر صعب لكنه ليس مستحيلًا. «كوكب» بهذه الدرجة الشديدة من البعد لا يحتاج لأن يكون مرتبطًا بتأثير الجاذبية بالشمس، لكن قد يكون مجرد جرم متجول بين النجوم في الفضاء، ومن الوارد أن يكون قد أفلت من مجموعة كواكب تتبع نجمًا آخر.

الفصل السابع

الكواكب الواقعة خارج المجموعة الشمسية

لم يعد هناك شك في أن الكواكب شائعة حول النجوم الأخرى. وحتى وقت قريب نسبيًّا، كان هذا الأمر محض افتراض، لكن بحلول عام ٢٠١٠ كان قد تجاوز عدد النجوم التي ثبت أن كوكبًا واحدًا على الأقل يدور حولها ٤٠٠ نجم. وبوضع مدى صعوبة إجراء عمليات الكشف هذه في الحسبان، يتضح أن أغلب النجوم الشبيهة بالشمس لا بد أن تصاحبها كواكب. ولتجنُّب الخلط، عادة ما يشير إليها المتخصصون باسم «الكواكب الواقعة خارج المجموعة الشمسية». ويُستثنى من الكواكب الواقعة خارج المجموعة الشمسية الأجرام المعتمة الغريبة التي تتجاوز كتلتها ١٣ ضعفًا من كتلة كوكب المشتري، وهو الحد الذي يمكن أن يحدث بعده الاندماج النووي للديوتيريوم (الهيدروجين الثقيل). هذه الأجرام يُطلق عليها «الأقزام البنية»، وهي تُعَد أشبه بالنجوم منها بالكواكب.

(١) طرق الاكتشاف

بدأت تتزايد الأدلة على أن معظم النجوم الأحدث عمرًا تحيط بها حلقة غبارية، وذلك في أواخر فترة السبعينيات من القرن العشرين. وأتت الدلائل الأولى من تأثير الغبار على الطيف تحت الأحمر لنجم معين، ثم بدأ الحصول على صور أقراص الغبار في فترة الثمانينيات من القرن العشرين. وبغض النظر عما إذا كانت هذه الأقراص تشبه السديم الشمسي قبل أن تتشكل الكواكب، أو تمثل بقايا من الغبار، ظلت موجودة ضمن ما يقوم مقام حزام كايبر في هذا النجم، فمجرد وجودها أثبت أنه لا بد أن يكون هناك كَمٌّ

وافر من الكواكب أيضًا. وقد تم أول اكتشاف أكيد لكوكب خارج المجموعة الشمسية في عام ١٩٩٥، بعدها بدأت تتوالى الاكتشافات عامًا بعد عام.

(١-١) السرعة الشعاعية

الاكتشاف الأول لكوكب خارج المجموعة الشمسية وأغلب الاكتشافات التي أعقبته (أكثر من ٣٠٠ كوكب بحلول عام ٢٠١٠) تحققت عن طريق رصد تغيُّرات طفيفة في السرعة الشعاعية لنجم معين، ويقصد بالسرعة الشعاعية السرعة التي يسير بها نجم باتجاه كوكب الأرض أو بعيدًا عنه، بغض النظر عن أي حركة عبر خط الرؤية. ويمكن أن تتحدد تغييرات السرعة الشعاعية حتى مقدار دقيق ملحوظ، يبلغ مترًا في الثانية، عن طريق قياس الانزياحات الحادثة في الطول الموجي المحدد، الذي تظهر عنده الخطوط الامتصاصية في طيف النجم. تحدث الانزياحات نحو أطوال موجية أقصر («الانزياح نحو الأزرق») إذا كان النجم يتحرك نحونا، في حين تحدث نحو أطوال موجية أطول («الانزياح نحو الأحمر») إذا كان النجم يتحرك بعيدًا، وذلك في ظاهرة تُعرف باسم «تأثير دوبلر». والتباينات في السرعة الشعاعية استُخدمت لوقت طويل في قياس السرعات المدارية للنجوم المزدوجة (ومن ثم في استنتاج كتلتها)، لكن التأثير الطفيف لكوكب يقع خارج المجموعة الشمسية وأقل ضخامة بكثير على نجم يُعدُّ نسبيًّا أكثر ضخامة بكثير يتطلب أجهزة حديثة حساسة للغاية. ويتعين تفسير التغييرات الحادثة في السرعة الشعاعية، التي تتسبب فيها الحركة المدارية لكوكب الأرض، قبل أن تُفسر التغييرات الأكثر خفاءً، التي تُعزَى إلى سحب الكوكب الواقع خارج المجموعة الشمسية في اتجاه نجمه.

وتعتمد الجاذبية بين نجم وكوكب خارج المجموعة الشمسية على مجموع كتلتيهما. لحسن الحظ أنه بالنسبة للنجوم الشبيهة بالشمس، توجد علاقة معلومة جيدًا بين النمط الطيفي للنجوم وكتلتها. استنادًا إلى ذلك، يمكننا استخدام فترة ومقدار التغييرات الحادثة في السرعة الشُّعاعية لتحديد كتلة الكوكب الواقع خارج المجموعة الشمسية المسئول عن حركة النجم للأمام وللخلف. ولا يوجد عادةً مقياس مستقل لتحديد اتجاه المستوى المداري لكوكب خارج المجموعة الشمسية، وإذا لم يكن المستوى المداري مواجهًا بزاوية لخط رؤيتنا، فإن التغيير الحقيقي في السرعة لا بد أن يكون أكبر مما نكتشفه. ومع ذلك، فإن المجادلات الإحصائية (القائمة على أساس افتراض مستويات مدارية

موجهة عشوائيًّا) تشير إلى أن أغلب الكتل يمكن ألَّا تزيد على ضعف الرقم المُقدَّر بافتراض أن المدار مواجه بزاوية لخط رؤيتنا.

وتتناسب طريقة السرعة الشعاعية على أفضل نحوٍ مع الكواكب الضخمة التي تدور بالقرب من نجمها؛ لأن ضخامة الكتلة والقرب الشديد يؤديان إلى حدوث أكبر تغييرات في السرعة الشعاعية للنجم؛ لذلك لا داعي للعجب من أن الكواكب الأولى المكتشفة خارج المجموعة الشمسية غالبًا ما كانت أكثر ضخامة من كوكب المشتري، لكنها تدور في مدارات لا تبعد سوى جزء من وحدة فلكية عن نجومها.

واكتشاف هذه الكواكب التي يُطلق عليها كواكب «المشتري الحار» أثارَ نوعًا من الجدل؛ لأنها تقع داخل الخط الجليدي لنجومها، ولا يمكن أن تكون قد تَشكَّلَت في المكان الذي نراها فيه الآن. ومن المسلَّم به حاليًّا أنها كَبُرت أكثر ثم هاجرت نحو الداخل. وهذا أثار الجدل من جديد حول نطاق هجرة الكواكب في مجموعتنا الشمسية في بداية تاريخها. فلو أن كوكب المشتري استمر في هجرته نحو الداخل، لكان قد دمَّر أو بعثر جميع الكواكب الأرضية واحدًا تلو الآخر. لفترة قصيرة من الوقت، فتَحتْ كواكب «المشتري الحار» الباب أمام افتراض أن مثل هذه النتيجة كانت طبيعية، وأن المجموعات الكوكبية كمجموعتنا نادرة للغاية، لكن التقنيات المطورة والإضافية لاكتشاف كواكب خارج المجموعة الشمسية بدأت تتوصل إلى كواكب صخرية؛ ما يشير إلى أن كثرة عدد كواكب «المشتري الحار» في الاكتشافات الأولى كانت ناتجةً عن تفضيل في الاختيار بسبب سهولة عملية الاكتشاف.

(١-٢) العبور

الطريقة الثانية من حيث الفاعلية لاكتشاف كواكب واقعة خارج المجموعة الشمسية، التي من المرجَّح أن تتفوق قريبًا على طريقة السرعة الشُّعاعية؛ تتمثل في البحث عن حالات «عبور» تحدث عندما يُحجب جزء ضئيل من ضوء نجم خلال عبور كوكب واقع خارج المجموعة الشمسية أمامه. وتُكتشف معظم حالات العبور عن طريق عمليات مسح متكررة لنجوم محتملة تتم من خلال تليسكوبات مُؤَتْمَتَة موجودة على كوكب الأرض، أو تليسكوبات متخصصة موجودة في الفضاء.

ولا يمكن أن تحدث حالة عبور إلا إذا كان المستوى المداري للكوكب الواقع خارج المجموعة الشمسية يقع على نفس خط رؤيتنا تقريبًا، وهو الأمر الذي لا بد أن ينطبق

إحصائيًّا على نحو نصف في المائة فقط من جميع مجموعات الكواكب الواقعة خارج المجموعة الشمسية. وتعتيم ضوء النجم يكون طفيفًا، لكنه يكون أكبر ما يمكن بالنسبة لأكبر الكواكب حجمًا خارج المجموعة الشمسية، ويحدث بمعدل أكبر (ومن ثم يزيد احتمال رصده) بالنسبة للكواكب الواقعة خارج المجموعة الشمسية التي تدور بالقرب من نجمها. ومن جديد، اكتشاف كواكب «المشتري الحار» مفضل على أي نوع آخر من الكواكب. ويمكن استخدام مقدار التعتيم الذي يحدث لضوء النجم في استنتاج حجم الكوكب مقارنة بنجمه. ومدة العبور تعطينا دلائل على السرعة المدارية ونصف القطر المداري، لكن قياسات السرعة الشعاعية التالية يمكن أن تعطينا فكرة أفضل عن خصائص المجموعة الكوكبية. ولأن حدوث حالة عبور يبين أن المستوى المداري يقع في خط رؤيتنا، تعتبر الكتل المستنتجة من خلال طريقة السرعة الشعاعية قيمًا صحيحة وليست تقديرات للحد الأدنى.

(١-٣) التصوير والطرق الأخرى

تصوير الكواكب الواقعة خارج المجموعة الشمسية أمر صعب للغاية؛ لأن هذه الكواكب تكون أكثر خفوتًا بكثير من نجومها. وقد تم تصوير كواكب تقع خارج المجموعة الشمسية حول عدد ضئيل من النجوم. وكما قد تتوقع، كانت جميع هذه الكواكب بحجم كوكب المشتري أو أكبر، كما كانت تدور — في الغالب — حول نجم على بُعد عشرات أو حتى مئات الوحدات الفلكية. في عام ٢٠٠٨، أظهرت صورة — تم الحصول عليها بإحدى تقنيات التكييف البصري باستخدام تليسكوبات تعمل بالأشعة تحت الحمراء في هاواي — ثلاثة كواكب خارج المجموعة الشمسية تدور حول نجم أحدث عمرًا يشبه الشمس (أطلق عليها «إتش آر ٨٧٩٩»)، وذلك على بعد ٢٤ و٣٨ و٦٨ وحدة فلكية. ويوجد وراء هذه الكواكب الثلاثة قرص غباري على بعد ٧٥ وحدة فلكية.

طريقة أخرى لاكتشاف الكواكب الواقعة خارج المجموعة الشمسية يُطلق عليها «القياس الفلكي»، وهي طريقة واعدة للغاية تقوم على أساس قياس دقيق جدًّا لموقع النجم في السماء. وأي رفيق دوار غير مرئي سوف يشد النجم من جانب إلى آخر، والقياس الفلكي يسعى لاكتشاف هذا، بدلًا من تغييرات السرعة الشعاعية على طول خط الرؤية. وتكون الحركة في أعلاها إذا كان سبَّبَها كوكبٌ ضخمٌ في مدار كبير؛ ومن

ثم فإن هذه الطريقة مكمِّلة للطرق الأكثر حساسية للمدارات الصغيرة. وأول نجاح مؤكد لطريقة القياس الفلكي تحقق في عام ٢٠٠٢، عندما وثَّق تليسكوب هابل الفضائي تأرجحات جانبية للنجم المسمى «جليزا ٨٧٦»؛ ما عدَّل معرفتنا بشأن كوكب تُعادل كتلته ٢٫٦ من كتلة كوكب المشتري يدور حول نجم على بُعد ٠٫٢٠ وحدة فلكية، كان قد اكتُشف فعليًّا عن طريق تغييرات السرعة الشعاعية. وأول اكتشاف بالقياس الفلكي لكوكب كان مجهولًا في السابق تحقق في عام ٢٠٠٩، عندما تم العثور على نجم قزم أحمر اللون، أُطلق عليه «في بي ١٠»، يضطرب في موقعه بسبب كوكب تُعادل كتلته ستة أضعاف كتلة كوكب المشتري.

وهناك أسلوب مختلف تمامًا يستفيد من الاصطفاف الدقيق العشوائي (الذي لا يتكرر أبدًا) بين نجم أمامي ونجم خلفي؛ حيث يقوم النجم الأمامي مقام «العدسة الدقيقة الجذبوية» التي تضخِّم الضوء الصادر من النجم الخلفي. والسطوع المكتشف للنجم الخلفي يزيد ثم ينقص على مدار عدة أسابيع. فإذا تصادف وكان لدى النجم الأمامي كوكب، فإن هذا سيسبب زيادة وجيزة في السطوع (تستمر بضع ساعات أو أيام) على خلفية حالة الزيادة والنقصان الأكثر بطئًا. بحلول عام ٢٠١٠، كانت تقنية العدسة المستدقة قد اكتشفت عشرة كواكب خارج المجموعة الشمسية.

(١-٤) تسمية الكواكب الواقعة خارج المجموعة الشمسية

لا تُعطى أسماء للكواكب الواقعة خارج المجموعة الشمسية، ويتم تحديدها بإضافة حروف بعد اسم النجم التابعة له، أو الرمز المعطى لها. فأول كوكب يُكتشف خارج المجموعة الشمسية أُعطى له الحرف ب، والثاني ج وهكذا (لا يستخدم الحرف أ)؛ ومن ثم فإن الكوكب «جليزا ٨٧٦» هو «جليزا ٨٧٦ ب»، ويوجد كوكبان تم اكتشافهما لاحقًا في نفس المجموعة الكوكبية هما «جليزا ٨٧٦ ج» و«جليزا ٨٧٦ د». هذا الأسلوب يعيبه أن الحروف لا تعطي أي فكرة عن مواقع الكواكب في الأنظمة التي تحتوي على العديد من الكواكب خارج المجموعة الشمسية، لكنه أسلوب لا بأس به على أي حال، وربما يكون من الحكمة عدم إعطاء أسماء محددة لتلك الكواكب؛ فربما سكان تلك الكواكب لديهم أسماء مناسبة تمامًا لكواكبهم.

(٥-١) الأنظمة المتعددة الكواكب الواقعة خارج المجموعة الشمسية

من المعلوم أن هناك كواكب متعددة تدور حول نحو ٥٠ نجمًا خارج المجموعة الشمسية. ويتم الحصول على هذه المعلومات باستخدام مجموعة من طرق الاكتشاف في بعض الأحيان، لكن السرعة الشعاعية يمكنها بمفردها القيام بالمهمة: كل ما هنالك أن هذه الطرق تستخدم لمحاولة تفسير التنويعات الدورية الأكثر خفاءً. يتضمن الجدول رقم ٧-١ بعض الأنظمة المتعددة الكواكب الأكبر حجمًا خارج المجموعة الشمسية. ومن بين هذه الأنظمة، يُعَد نظام أو مجموعة «جليزا ٥٨١» (وهو نجم قزم أحمر يبعد عنا مسافة تبلغ نحو ٢٠٫٥ سنة ضوئية) جديرًا بالملاحظة؛ فهذا النظام يشتمل على أصغر كوكب معروف يقع خارج المجموعة الشمسية، وهو الكوكب «جليزا ٥٨١ هـ» الذي قد لا تزيد كتلته على ١٫٩ من كتلة كوكب الأرض (وأقل من ٤ أضعاف كتلة كوكب الأرض على نحو شبه مؤكد)، كما يشمل النظام أيضًا كوكب «جليزا ٥٨١ د»، وهو عبارة عن كوكب شبيه بكوكب الأرض مغطًّى بمحيط (ضخم)، وتزيد كتلته على سبعة أضعاف كتلة كوكب الأرض. ويُستبعد أن تكون هناك حياة على سطح الكوكب «جليزا ٥٨١ هـ»؛ لأن درجة حرارته مرتفعة ارتفاعًا هائلًا، بل ربما يمنع هذا الارتفاع الهائل في درجة الحرارة احتفاظ الكوكب بغلاف جوي، لكن بالنسبة للكوكب «جليزا ٥٨١ د» يبدو أنه يقع في النطاق المناسب للسُّكنى بالنسبة لنجمه.

جدول ٧-١: بعض الأنظمة المتعددة الكواكب الواقعة خارج المجموعة الشمسية. تقديرات بعض الكتل الواردة بالجدول معطاة بالحد الأدنى لها.

النجم	الكوكب الواقع خارج المجموعة الشمسية	الكتلة (مقارنة بكتلة المشتري)	نصف القطر المداري (بالوحدة الفلكية)	الفترة المدارية (بالأيام)
٥٥ كانكري	هـ	٠٫٠٢٤	٠٫٠٣٨	٢٫٨٢
	ب	٠٫٨٢	٠٫١٢	١٤٫٧
	ج	٠٫١٧	٠٫٢٤	٤٤٫٣
	و	٠٫١٤	٠٫٧٨	٢٦٠
	د	٣٫٨	٥٫٧٧	٥٢١٨

النجم	الكوكب الواقع خارج المجموعة الشمسية	الكتلة (مقارنة بكتلة المشتري)	نصف القطر المداري (بالوحدة الفلكية)	الفترة المدارية (بالأيام)
جليزا ٨٧٦	د	٠,٠٢١	٠,٠٢١	١,٩٤
	ج	٠,٧١	٠,١٣٠	٣٠,١
	ب	٢,٣	٠,٢٠٨	٦١,١
	هـ	٠,٠٤٦	٠,٣٣٤	١٢٤
جليزا ٥٨١	هـ	٠,٠٠٦١	٠,٠٣	٣,١٥
	ب	٠,٠٤٩	٠,٠٤١	٥,٣٧
	ج	٠,٠١٧	٠,٠٧	١٢,٩
	د	٠,٠٢٢	٠,٢٢	٦٦,٨
يو آند	ب	٠,٦٩	٠,٠٥٩	٤,٦٢
(أبسيلون	ج	١١,٦	٠,٨٣	٢٣٧,٧
آندروميدا)	د	١٠,٣	٢,٥٥	١٣٠٣
إتش دي ١٦٠٦٩١	ج	٠,٠٣٣	٠,٠٩١	٩,٦٤
	د	٠,٥٢	٠,٩٢	٣١١
	ب	١,٧	١,٥	٦٤٣
	هـ	١,٨	٥,٢	٤٢٠٦
إتش آر ٨٧٧٩	ب	١٠	٢٤	٣٦٥٠٠
	ج	١٠	٣٨	٦٩٠٠٠
	ب	٧	٦٨	١٧٠٠٠٠

وأقرب نجم خارج المجموعة الشمسية معلوم أن له كوكبًا هو «إبسيلون إريداني» الذي لا يبعد إلا بمسافة ١٠,٥ سنوات ضوئية فقط. والكوكب «إبسيلون إريداني ب»، المُكتشَف باستخدام طريقة السرعة الشعاعية، هو كوكب عملاق له نفس كتلة كوكب

المشتري، ويدور في مدار على بعد ٣٫٤ وحدات فلكية. والتليسكوبات التي تستخدم الأشعة تحت الحمراء تُظهر أن النجم تصاحبه نطاقات من الحطام الصخري (أحزمة كويكبات) تتمركز على بُعد نحو ٣ و٢٠ وحدة فلكية، إضافة إلى قرص غباري خارجي يمتد من ٣٥ إلى ١٠٠ وحدة فلكية. وقد استُشهد بالهيكل الموجود في القرص الغباري باعتباره دليلًا على وجود كوكب غير مؤكد تبلغ كتلته عُشر كتلة كوكب المشتري، وهو الكوكب «إبسيلون إريداني ج» على بُعد نحو ٤٠ وحدة فلكية.

(١-٦) الدراسة

المعلومات المباشرة التي لدينا عن أي كوكب واقع خارج المجموعة الشمسية محدودة، فإذا حددنا الكتلة (عن طريق السرعة الشعاعية أو القياس الفلكي)، يمكننا أن نستنتج الحجم بافتراض كثافة محتملة. وحدوث حالة عبور سوف تكشف الحجم الذي يمكن استنتاجه أيضًا عن طريق التصوير (بناءً على السطوع والوضاءة المفترضة). ويمكننا أن نستنتج الكتلة من الحجم إذا افترضنا الكثافة. وبُعد الكوكب عن نجمه يعطينا فكرة جيدة عن درجة حرارة السطح (أو الغلاف الجوي)، لكن هذا يعتمد أيضًا على الوضاءة ومزيج غازات الدفيئة في أي غلاف جوي؛ لذا فإن هناك هامشًا كبيرًا للخطأ.

التطور الرئيسي التالي في دراسة الكواكب الواقعة خارج المجموعة الشمسية سوف يتحقق — على الأرجح — مع تطوير قدرتنا على تحليل تركيب أغلفتها الجوية. ويمكن القيام بذلك على أكمل وجه عن طريق التليسكوبات الموجودة في الفضاء؛ فهي قادرة على عزل وتحليل الأطياف المرئية تحت الحمراء للكواكب المختلفة خارج المجموعة الشمسية، لا سيما الكواكب التي تشبه كوكب الأرض. ويمكن التعرف على العديد من أنواع غازات الغلاف الجوي الكثيرة عن طريق خواصها الامتصاصية. واكتشاف زوجين من الغازات لا يفترض أنهما يتواجدان معًا في ظروف كيميائية بسيطة، مثل الأكسجين والميثان؛ قد يكون أول دليل نحصل عليه يثبت وجود حياة تؤثر على الغلاف الجوي لكوكب خارج المجموعة الشمسية بنفس الطريقة التي تغير بها الغلاف الجوي لكوكب الأرض تغيرًا جذريًّا.

(٢) الحياة على الكواكب الواقعة خارج المجموعة الشمسية

يوجد نحو ١٠ آلاف مليون نجم شبيه بالشمس في مجرتنا (نحو ١ في كل ١٠ من إجمالي النجوم)، ولا بد أن تكون الكواكب الواقعة خارج المجموعة الشمسية وفيرة بعد أن وُجد أنها تدور حول نصف النجوم الشبيهة بالشمس التي خضعت لدراسة ملائمة. معظم الكواكب التي اكتُشفت إلى الآن خارج المجموعة الشمسية كواكب عملاقة؛ لأن هذه هي الأسهل في اكتشافها، ولا يوجد دليل بعدُ على أن الكواكب الشبيهة بالأرض شائعة. والواضح أن الأنظمة الكوكبية متنوعة، ومن غير المحتمل أن يكون قد نجا كوكب شبيه بالأرض من الهجرة نحو الداخل من جانب كوكب من كواكب «المشتري الحار»، مثل «يو آند بي» الذي يدور حاليًّا على بُعد ٠٫٠٦ وحدة فلكية من نجمه (انظر الجدول رقم ٧-١)، لكن نظرًا لأننا «بدأنا» في العثور على كواكب شبيهة بالأرض، فمن المحتمل أن مثل هذه الكواكب تقع في نسبة لا بأس بها من أنظمة الكواكب الواقعة خارج المجموعة الشمسية.

والسؤال عن عدد الكواكب الواقعة خارج المجموعة الشمسية التي قد تصلح للحياة سؤال محير. لنكن متحفظين جدًّا في تقديراتنا ونقول إن ١٪ — في المتوسط — من النجوم الشبيهة بالشمس يدور حوله كوكب شبيه بالأرض في نطاق قابل للسكنى لأمد طويل. هذا يعطينا ١٠٠ مليون كوكب شبيه بالأرض وقابل للسُّكنى في مجرتنا. والمرجح أنه يوجد — على الأقل — نفس العدد من الأقمار القابلة للسكنى التي تدور حول الكواكب العملاقة الواقعة خارج المجموعة الشمسية.

الخطوة التالية في التسلسل المنطقي أبعد بكثير من هذا عن حد التيقن؛ فاستنادًا إلى الظروف التي تتطلبها الحياة: ما مدى احتمالية أن تبدأ حياة؟ إن أساسيات قيام حياة ليست عائقًا؛ فنحن نعلم أن الفضاء مليء بجزيئات عضوية وبكَمٍّ وفير من الماء أيضًا؛ ومن ثم فإن معظم الكواكب الواقعة خارج المجموعة الشمسية في نطاق قابل للسكنى سوف يتوفر بها جميع المتطلبات الضرورية لقيام حياة أساسها الكربون. هذا يعني «الحياة كما نعرفها» — تلك العبارة الشهيرة التي وردت في فيلم «ستار تريك» — دون الانخراط في التكهن بشأن أشكال الحياة الأخرى المعتمدة على كيميائيات غريبة.

وسهولة أو صعوبة نشأة الحياة تلقائيًّا تمثل فجوة كبيرة في فهمنا؛ فالكثيرون (وأنا من بينهم) يرون أن التريليونات التي لا تحصى من الجزيئات العضوية الملائمة في محيط كوكب خارج المجموعة الشمسية، والتفاعلات التي تتم بينها على مدار ملايين

السنين كفيلتان ببدء الحياة على سطحه. وبمجرد أن تنتشر الحياة، يكون من الصعب معرفة الكيفية التي يمكن أن تختفي بها تمامًا، لكن إذا حدث واختفت، يفترض أن تظهر من جديد بنفس السهولة.

نعلم أن الحياة على كوكب الأرض لم تستغرق أكثر من ٥٠٠ مليون سنة كي تتوطد دعائمها. ووجود حياة في المجرة (وفيما وراءها بطبيعة الحال) سوف يظل غير مؤكد إلى أن نكتشف دلائل حياة على كواكب واقعة خارج المجموعة الشمسية. وحتى إن وجدنا حياة قائمة (أو سابقة) على سطح كوكب المشتري أو القمر أوروبا أو القمر إنسيلادوس، فلا يمكننا القفز إلى النتيجة التي مفادها: أن الحياة كانت قد بدأت هناك على نحو مستقل؛ لأن الأجرام في المجموعة الشمسية ليست معزولة تمامًا بعضها عن بعض؛ فالميكروبات قادرة على البقاء حية عند انتقالها من جرم لآخر داخل شظايا من المقذوفات الصدمية، ومن الممكن أن تكون الحياة على القمر أوروبا قد أتته من كوكب الأرض؛ ويُعتقد أن الحياة على كوكب الأرض وصلت إليها بفضل نيزك أتاها من كوكب المريخ.

(٢-١) هل من أحد هناك؟

إذا كانت توجد حياة حول النجوم الأخرى، فماذا عن الكائنات الذكية؟ لنتكهن بعقلانية. وفقًا لما لدينا من معلومات، تحتاج الكائنات البيولوجية الذكية إلى حياة عديدة الخلايا. وإذا بدأت الحياة الميكروبية، فما احتمالات أن يؤدي التطور اللاحق إلى كائنات عديدة الخلايا؟ لديك حرية الإجابة عن هذا السؤال؛ فلقد استغرق الأمر عدة مليارات من السنين كي تظهر هذه الكائنات عديدة الخلايا على سطح كوكبنا الأرضي.

وبعد ظهور الحياة العديدة الخلايا، هل ستؤدي المنافسة إلى تطور دارويني كما حدث على كوكبنا الأرضي؟ ووجود كائنات ذكية أحد العوامل التي تمنح ميزة، فما مدى حتميته إذن؟

وحتى استنادًا إلى الرقم الْمُتحفِّظ الذي فرَضته للكواكب القابلة للسكنى الشبيهة بكوكب الأرض في مجرتنا؛ وهو ١٠٠ مليون، إضافة إلى الرؤية المتشائمة بأن احتمالات بدء الحياة لا تتعدى نسبتها ١٪؛ فإن هذا يترك مليونًا من العوالم التي بها حياة، وكوكب الأرض من بينها. قد يكون غريبًا (ومذهلًا) إذا تبين أن كوكب الأرض هو الوحيد من

بين هذا العدد من الكواكب الذي تعيش على ظهره كائنات ذكية، لكن إذا كانت الحياة متوفرة بهذا القدر، وإذا كانت الكائنات الذكية ترتبط دومًا بوجود حياة، فأين تلك الكائنات إذن؟ إذا لم تكن الحياة نادرة الظهور، وإذا لم تكن تستمر لوقت طويل (على سبيل المثال، حضارتنا قد تندثر بسبب الحروب، أو وقوع كوارث طبيعية، أو بسبب تغير المناخ بفعل النشاط البشري)، فلا بد أن مجرتنا تعج بالكائنات الذكية.

وقد لا يشترط أن تكون الكائنات الذكية في نفس المكان الذي نعثر على حياة فيه؛ فبالرغم من أن المسافات بين النجوم شاسعة، فمن الممكن عمليًّا السفر بينها. لست بحاجة إلى سفر أسرع من الضوء؛ كل ما تحتاج إليه هو التصميم والصبر. تخيَّلْ سفينة فضاء كبيرة بما يكفي لأن تحوي مئات من البشر، وتستغرق ١٠٠ عام للسفر إلى كوكبٍ واقعٍ خارج المجموعة الشمسية قابلٍ للسكنى، يتبع نجمًا يبعد بمسافة ١٠ سنوات ضوئية. يمكننا إنشاء تلك السفينة بأنفسنا باستخدام تقنيات يمكن التوصل إليها في العقود القليلة القادمة. قد يعيش ويموت جيل أو جيلان من الطاقم وهو في الطريق (ما لم يُستخدم نوعٌ ما من تعليق الحياة، وهو تعطيل الوظائف الحيوية لفترة من الزمن مع بقاء الكائن على قيد الحياة)، وتكون الرحلة — على الأرجح — رحلة ذهاب دون عودة. وإذا أرسلنا مثل هؤلاء المستعمرين إلى جميع الكواكب القريبة القابلة للسكنى الواقعة خارج المجموعة الشمسية (نتوقع أن نحدد ونعرف خصائص تلك الكواكب بحلول نهاية هذا القرن)، فلن يمضي وقت طويل قبل أن تصبح المستعمرات الناجحة قادرة على إطلاق سفن مستعمراتها الخاصة، وهكذا يستمر الحال. يبلغ عرض المجرة ١٠٠ ألف سنة ضوئية. وحتى إذا استغرقت موجة استعمارية ألف سنة للانتشار على مساحة ١٠ سنوات ضوئية، يمكن أن تُستعمر المجرة بأكملها في فترة لا تتجاوز ١٠ ملايين سنة. والكوارث التي تكتسح عوالم بأكملها أو إخفاقات مستعمرات معينة قد لا تكون كافية لجعل العملية تنحرف عن مسارها بمجرد أن تبدأ.

يبلغ عمر مجرتنا أكثر من ١٠ مليارات سنة. وإذا كانت الكائنات الذكية متوفرة، فلا بد أنه كان هناك متسع من الوقت لعدد لا حصر له من الأنواع السابقة كي تستعمر المجرة. هذه هي مفارقة «فيرمي» التي سُميت بهذا الاسم بناءً على تعليقات الفيزيائي الأمريكي إنريكو فيرمي عام ١٩٥٠. لا بد أن الحضارات خارج كوكب الأرض عديدة، لكن ليس هناك دليل عليها: لم تُكتشف بعدُ إشارات من الفضاء صادرة عن كائنات خارج الأرض (بالرغم من عمليات مسح السماء التي تجريها فِرَق تعمل تحت شعار

«البحث عن ذكاء خارج الأرض»)، كما أنه ليست هناك دلائل على أعمال عظيمة في مجال هندسة الفلك، ولم يتم توثيق زيارات فعلية قامت بها كائنات فضائية إلى كوكب الأرض. فهل الحياة الذكية أمر نادر الوجود، أم أننا على درجة عالية من الغباء أوصلتنا إلى عدم اكتشاف الأدلة؟ آمل أن نتبين حقيقة الأمر في يوم من الأيام.

قراءات إضافية

There is a rich literature associated with astronomy and planetary science. The trouble is that, the longer or more specialized the book, the faster it goes out of date. On the other hand, some (not all!) websites are frequently updated. To help you discover more about planets, I suggest a few of the best books and several appropriate entry points to the internet.

(١) العام

J. K. Beatty, C. C. Peterson, and A. Chaikin (eds.), *The New Solar System,* 4th edn. (Sky Publishing Corporation and Cambridge University Press, 1999). This covers the lot. Each chapter is written by a specialist author. Badly dated in parts, but it remains a highly accessible classic.

I. Gilmour and M. A. Sephton (eds.), *An Introduction to Astrobiology* (Cambridge University Press, 2003). Updated in 2007, this is the second of two volumes based around an Open University course on planetary science, written at early undergraduate level. This one covers life, Mars, Europa, and Titan as potential habitats, and exoplanets. New edition expected 2011.

N. McBride and I. Gilmour (eds.), *An Introduction to the Solar System* (Cambridge University Press, 2003). Updated in 2007, this is the first of

two volumes based around an Open University course on planetary science, written at early undergraduate level. It covers all the major components of the Solar System, except the Sun. New edition expected 2011.

S. A. Stern (ed.), *Our Worlds: The Magnetism and Thrill of Planetary Exploration* (Cambridge University Press, 1999). Easy but informative reading. Each chapter is a personal account by one of the leading practitioners.

D. A. Weintraub, *Is Pluto a Planet?* (Princeton University Press, 2007). If you've read this far, then you already know the answer to the question posed by this book's title. However, it covers much more than that, being an historical account of human perception of planets from ancient times right up to the recent squabbles over the classification of TNOs.

(٢) الكواكب الأرضية

M. Hanlon, *The Real Mars* (Constable, 2004). A science writer's perspective on Mars, simply written and beautifully illustrated.

J. S. Kargel, *Mars: A Warmer Wetter Planet* (Springer Praxis, 2004). One leading scientist's personal view of the role of hidden water on Mars.

R. M. C. Lopes and T. K. P. Gregg (eds.), *Volcanic Worlds: Exploring the Solar System's Volcanoes* (Springer Praxis, 2004). A popular account, with chapters by specialist authors dealing with volcanism on each terrestrial planet, the Moon, Io, and icy satellites.

R. G. Strom and A. L. Sprague, *Exploring Mercury* (Springer Praxis, 2003). This is the best review of Mercury that I know, but written before MESSENGER began to study the planet.

(٣) الكويكبات

J. Bell and J. Mitton (eds.), *Asteroid Rendezvous: NEAR Shoemaker's Adventures at Eros* (Cambridge University Press, 2002). A well-illustrated and popular account of the findings of the first probe to orbit and then crash onto an asteroid.

(٤) الكواكب العملاقة

F. Bagenal, T. Dowling, and W. McKinnon (eds.), *Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere* (Cambridge University Press, 2004). A fat volume with 26 chapters written by specialist authors. Will take you much further than the current book.

E. D. Miner and R. R. Wessen, *Neptune: The Planet, Rings and Satellites* (Springer Praxis, 2002). A much slimmer and more simply written volume. Unlikely to date badly.

(٥) الأقمار

R. Greenberg, *Unmasking Europa* (Springer, 2007). A clear and authoritative account of Europa, including some scathing passages about how Greenberg's research team had to struggle against the establishment to gain acceptance for their thin ice interpretation.

R. Lorenz and J. Mitton, *Titan Unveiled* (Princeton University Press, 2008). The first author is a key member of the *Cassini-Huygens* team that explored Titan, so this is an insightful account. However, it was written before Titan's lakes were fully recognized.

D. A. Rothery, *Satellites of the Outer Planets,* 2nd edn. (Oxford Unversity Press, 1999). Written by myself, this is an account of large satellites from Jupiter to Neptune at a level that should suit if the current book has

left you wanting more. It includes some Galileo findings, but pre-dates the *Cassini-Huygens* mission to Saturn so is out of date in parts.

(٦) الكواكب الواقعة خارج المجموعة الشمسية

H. Klahr and W. Brander (eds.), *Planet Formation* (Cambridge University Press, 2006). More technical than most others in this list, this volume is based on papers presented at a conference in 2004. It looks at planet formation in the light of modern theories for our Solar System and discoveries of exoplanet systems.

F. Casoli and T. Encrenaz, *The New Worlds: Extrasolar Planets* (Springer Praxis, 2007). The most up-to-date popular account of exoplanets that I could find.

(٧) مواقع ويب

The following websites were accessed 4 July 2010.

(٧-١) عام

(www.nasa.gov): NASA's home page. Click on the links here for news about missions or individual Solar System bodies.

(٧-٢) الصور

(pds.jpl.nasa.gov/planets/): NASA's 'Welcome to the Planets' site, offering a simple introduction to each body and a small selection of images.

(photojournal.jpl.nasa.gov/): A fuller archive of NASA images of Solar System bodies.

(http://www.esa.int/esa-mmg/mmghome.pl): Multimedia gallery provided by the European Space Agency.

(http://www.isas.ac.jp/e/index.shtml): Japan's Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), with links to images and movies from Japanese missions.

(arc.iki.rssi.ru/eng/index.htm): The Russian Space Research Institute (IKI). Follow the link to Planetary Exploration for access to images and information from Russian (and former Soviet) missions.

(hubblesite.org/gallery/): Gallery of images from the Hubble Space Telescope, searchable by name of planet.

(٧-٣) التسميات والخرائط

(http://www.mapaplanet.org/): A site where you can create your own maps of whatever region of a planet you choose, operated by the United States Geological Survey, Astrogeology Research Program.

(planetarynames.wr.usgs.gov/): A gazetteer of nomenclature on planets, satellites, and asteroids. Hosted by the United States Geological Survey, Astrogeology Research Program on behalf of the International Astronomical Union (IAU). Contains all you need to know about naming conventions, and up-to-date searchable lists of names of all kinds of features on each body.

(٧-٤) الأخبار والبيانات

(http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/): Has links for each planet and other classes of body, taking you to fact sheets and much more.

(http://www.minorplanetcenter.org/iau/mpc.html): Website of the IAU Minor Planet Center (at the Smithsonian Astrophysical Observatory). Especially good information on near-Earth objects.

(www.boulder.swri.edu/ekonews/): Electronic newsletter about the Kuiper belt, plus various useful links.

(www.exoplanet.eu): The Extrasolar Planets Encyclopedia. Includes a frequently updated catalogue tracking the current tally of known objects, and also tutorials on the various methods of detecting exoplanets.

(http://www.planetary.org/home/): The Planetary Society. An international (US-based) society promoting planetary exploration. A good source of relevant news and comment.

مصادر الصور

(1–2) © NASA.

(2–2) © NASA/JHUAPL/CIW.

(2–3) © NASA.

(2–4) © NASA/JPL.

(2–5) © NASA/JPL.

(2–6) © NASA.

(2–7) © USGS.

(2–8) © ESA/DLR/FU Berlin.

(2–9) © NASA.

(2–10) © NASA/JPL–Caltech.

(2–11) © USGS.

(2–12) © NASA/JPL/ASU.

(2–13) © ESA/VIRTIS/INAF–IASF/Obs. de Paris–LESIA/University of Oxford.

(2–14) © NASA/JPL/Malin Space Science Systems.

(3–2) © NASA, ESA.

(4–1) © NASA/JPL/SSI.

(4–2) © NASA/JHUAPL/SRI.

(4–3) © NASA/JPL/ASU.

(4-4) © NASA/JPL/SSI.

(4-5) © NASA/JPL/USGS.

(4-6) © NASA/JPL.

(5-1) © NASA/JPL/JHUAPL/JAXA.